

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2013»

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

ИВАНОВО, 23 – 25 апреля 2013 г.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**ТОМ 3
ЧАСТЬ 2**

ИВАНОВО

ИГЭУ

2013

УДК 620 + 621

ББК 31

Э 45

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. Ч. 2. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2013. – 252 с.

ISBN

ISBN

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**.

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

СЕКЦИЯ 16

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

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

Секретарь – к.т.н., доцент **Сайкин М.С.**

*Р.И. Канафеев, М.С. Жеваев, А.В. Танаев, студенты;
рук. В.М. Мякишев, к.т.н., доцент
(СамГТУ, г. Самара)*

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ПОВТОРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Известно, что дуговые процессы в межэлектродном пространстве определяются преддуговым состоянием межэлектродного пространства и процессами на катоде. Это обстоятельство существенно сказывается особенно при возбуждении дуги переменного тока. При введении в дуговой промежуток вещества с низким потенциалом ионизации процесс повторного возбуждения облегчается за счет наличия легко ионизируемых веществ. Этим эффектом пользуются при изготовлении электродов для сварки на переменном токе, но процесс повторного возбуждения неразрывно связан с динамическими свойствами источника питания [1]. Динамические свойства источника питания целесообразно оценивать максимальным значением напряжения и скоростью его нарастания.

Чем выше скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке, при постоянных процессах деионизации, тем более надежно повторное возбуждение дуги. Наиболее просто этот вопрос решается повышением скорости нарастания напряжения на дуговом промежутке, например за счет повышения напряжения холостого хода источника, однако, этот способ ограничен ГОСТом. Поэтому с целью повышения надёжности зажигания и устойчивого горения дуги желательно снизить напряжение холостого хода при обеспечении соответствующей скорости восстановления напряжения. Это возможно путём воздействия на динамические параметры источника питания.

Как отмечается в [2] повышение устойчивости можно достичь применением генераторов импульсов. Однако такие устройства требуют наличие емкостного накопителя энергии, мощного коммутирующего уст-

ройства и точной синхронизации подачи импульса. Обеспечить надёжное зажигание можно за счёт применения нелинейной индуктивности [3]. Применение нелинейной индуктивности в сварочных цепях позволяет кратковременно, на момент повторного возбуждения дуги повысить мгновенные значения напряжения, за счёт чего обеспечить надёжный пробой дугового промежутка.

Для анализа процесса устойчивости горения сварочной дуги необходимо совместное решение системы нелинейных уравнений, описывающих свойства источника питания и дуги. Из-за сложности процессов, протекающих в объекте, совместное решение этих уравнений затруднено и часто применяется раздельное их решение. Динамические свойства источника питания проще всего оценить индикаторным методом, предложенным П. Хаммарлундом. Этот метод основан на применении теоремы Тевенена и требует осциллографирования процесса с последующей расшифровкой. Так как процесс повторного возбуждения протекает при малых токах, то для анализа дуги целесообразней использовать модель Майера.

Математическая модель сварочной дуги, определяющая динамическую нелинейность системы, может быть получена, исходя из баланса мощности в дуге. [2] Так, в установившемся режиме

$$EI - P_{om} = 0,$$

где EI – мощность, выделяющаяся в единицы длины дуги; P_{om} – мощность, отводимая от единицы длины дугового столба.

При $EI - P_{om} < 0$ мощность, отводимая от дуги, превышает мощность, потребляемую из сети, и теплосодержание дуги Q уменьшается. Следовательно, условие динамического равновесия столба дуги, как известно, может быть записано в виде уравнения:

$$\frac{dQ}{dt} = EI - P_{om}. \quad (1)$$

Уравнение (1) может быть названо уравнением динамической дуги. В этом виде оно было предложено Майром.

При рассмотрении процессов повторного возбуждения, связанных с переходом тока через нулевое значение, с некоторым допущением можно считать $P_{om} = \text{const}$, что соответствует падающей статической характеристике реальной сварочной дуги.

По предложению Майра можно считают сопротивление дугового столба при отсутствии подводимой из вне мощности, в зависимости от теплосодержания, в виде:

$$R = R_0 e^{\frac{Q}{Q_0}}, \quad (2)$$

где Q_0 – некоторая условная постоянная.

Исходя из уравнения (1), можно получить дифференциальное уравнение динамической дуги. Заменим тепловую переменную электрическими переменными U_δ и I_2 используя уравнение (2), получим

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q_0}{R_0} \cdot \frac{dR}{dt}, \text{ где } R_0 = \frac{U_\delta}{I_2}. \quad (3)$$

Учитывая, что $U_\delta = I_2 R_0$, найдем производную от $g = 1/R$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{\frac{1}{I^2} \frac{dI_2}{dt} - \frac{1}{U_\delta} \cdot \frac{dU_\delta}{dt}}{R} = \frac{U_\delta I_2 - P_{0m}}{Q_0 R} = \frac{I_2^2}{Q_0} - \frac{P_{0m}}{Q_0 R}. \quad (4)$$

Итак, полагая $\theta = \frac{Q_0}{P_{0m}}$, получим

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R} \right) + \frac{1}{\theta R} = \frac{I_2^2}{Q_0}, \text{ или } \frac{dg}{dt} + \frac{g}{\theta} = \frac{I_2^2}{Q_0} \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой так называемую динамическую модель дуги в g-форме (модель Майра).

Величина $\theta = \frac{Q_0}{P_{0m}}$ имеет размерность времени и при постоянных Q_0 и P_{0m} , является величиной постоянной, а следовательно, может быть условно названа постоянной времени дуги.

Аналогично рассмотренному выше, уравнение динамической дуги (5) может быть получено в так называемой R-форме:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{\theta} - \frac{U_\delta^2}{\theta P_{0m}}. \quad (6)$$

В зависимости от описания поставленной задачи может быть использована g-форма (5) или R-форма (6) математической модели дуги.

Некоторые вопросы повторного возбуждения дуги рассмотрены с использованием программы MathCAD при схеме замещения свароч-

ного трансформатора второго порядка и модели сварочной дуги, предложенной Майером.

Компьютерный анализ процесса повторного возбуждения дуги подтверждает целесообразность учёта динамической индуктивности источника питания.

Библиографический список

1. Патон, Б.Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев. – М.: Машиностроение, 1966. – 367 с.
2. Лесков, Г.Н. Электрическая сварочная дуга / Г.Н. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
3. Мякишев, В.М. Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода / В.М. Мякишев. – Самара.

П.В. Домаров, асп., А.Г. Афиногентова, студ.;
рук. А.И. Алиферов, д.т.н., профессор
(НГТУ, г.Новосибирск)

ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Плазменные установки – это новый тип оборудования, применяемый для переработки техногенных (бытовых, медицинских, промышленных, сельскохозяйственных) отходов. Углеродсодержащие отходы являются возобновляемым энергетическим сырьем (например, твердые бытовые отходы соответствуют по теплотворной способности бурым углям) [1].

Одним из важнейших преимуществ, выводящих плазменные (высокотемпературные) технологии в принципиально иной класс процессов по экологичности и эффективности, является возможность окисления углерода до монооксида СО и исключение из технологического цикла балластного азота. Исключение балластного азота снижает количество отходящих газов более, чем в 5 раз по массе и в 3 раза по объему. Это позволяет эффективно очищать получаемый синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2 = 90\%$ и $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} = 10\%$). При этом шлам, получаемый при очистке синтез-газа, практически не содержит окисленных веществ и не заражен диоксинами и фуранами. Такое техническое решение гарантирует выполнение экологических требований к современным промышленным техноло-

гиям без использования многоступенчатых, сложных и дорогостоящих систем газоочистки.

Расчетно-теоретические исследования. Для прогнозирования многопараметрического электротехнологического оборудования при плазменной переработке/утилизации техногенных образований и отходов разработана физико-математическая модель шахтной плазменной электропечи. Получены распределения температур газа и шихты по высоте печи с учетом тепловых потерь через боковые стенки, при изменении расходов газа и при наличии источника тепловыделения за счет химических реакций. Установлено значительное влияние расхода высокотемпературного газа и химических реакций на интенсивность прогрева шихты. Полученные данные позволяют оптимизировать габариты плазменной электропечи, прогнозировать зону пиролиза и газификации органической составляющей техногенных отходов [2].

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными и получены вполне удовлетворительные совпадения. Аналогичных расчетов плазменной технологии переработки отходов ранее не проводилось.

Применение полученных результатов. Результаты расчетно-теоретических исследований могут быть использованы для разработки методики расчета реакционных объемов плазменных технологических аппаратов с целью оптимизации их габаритных размеров, местоположения максимального тепловыделения и плазмохимических реакций, а также зоны отбора отходящих газов для последующей их очистки.

Экспериментальные результаты исследований электродуговых генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов) требуются разработчикам конкретного электротехнологического оборудования для выбранной плазменной технологии. Практика использования плазменной техники убедительно показала, что технологический плазмотрон является штучным изделием (за исключением массовых тиражей плазменных установок для резки металлов и напыления защитных покрытий). Поэтому полученные энергетические и эрозионные характеристики некоторых конструктивных схем опытных плазмотронов следует рассматривать как методический материал применительно к другим конструкциям. Результаты исследованных конструкций экспериментальных плазмотронов могут быть использованы специализированными организациями для создания опытно-промышленных плазмотронов для плазменных электропечей и реакторов с целью реализации технологических процессов переработки и утилизации техногенных образований и отходов [3].

Поисковые исследования в области плазменных технологий переработки и утилизации углеродсодержащих отходов (бытовых, медицинских, промышленных, сельскохозяйственных) показали высокую эффективность принятых технических решений для последующей их реализации в опытно-промышленных электротехнологических плазменных установках. Результаты исследований позволяют перевести экспериментальные плазменные устройства в стадию ОКР с целью разработки конкурентоспособных технологий для последующей коммерциализации.

Изложенные выше преимущества новой плазменной технологии и новизна полученных результатов позволяют рекомендовать их для использования в больших и малых городах, на предприятиях, где образуются промышленные и сельскохозяйственные отходы, в медицинских учреждениях и специальных организациях для переработки токсичных образований и отходов.

Выводы

Продукты переработки отходов: синтез-газ, тепловая и электрическая энергия; шлак – сырьевой материал для строительства дорог и зданий.

Исследования термодинамических, теплотехнических и технологических процессов проведены на плазменно-дуговых печах и электроплазменных реакторах по переработке и утилизации твердых бытовых отходов. Суть этих технологий сводится к высокотемпературному пиролизу и газификации органической составляющей техногенных образований с получением синтез-газа ($H_2 + CO$), пригодного для нужд энергетики и химического производства. Неорганическая часть отходов в виде расплавленного шлака после грануляции может быть использована в строительной индустрии.

Библиографический список

1. **Аньшаков, А.С.** Плазменные электротехнологические установки: учеб. / А.С. Аньшаков, В.С. Чередниченко, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 602 с.
2. **Численное** моделирование теплообмена в плазменной электропечи при утилизации техногенных отходов / А.С. Аньшаков, А.И. Алиферов, В.А. Сеницын // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 165 – 171.
3. **Аньшаков, А.С.** Переработка техногенных отходов в электродуговой плазме / А.С. Аньшаков // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – № 9 (6). – С. 131 – 135.

С.И. Радько, асп., С.И. Творогов, студ.;
рук. А.С. Аньшаков, д.т.н., профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ КОНСТРУКЦИЙ СОСТАВНОГО ЭЛЕКТРОДА ПАРОВОДЯНОГО ПЛАЗМОТРОНА МОЩНОСТЬЮ ДО 100 КВТ

В ряде промышленных производств, для получения синтетических продуктов, переработки и утилизации техногенных отходов, газификации твёрдых топлив низкотемпературная плазма водяного пара является не только теплоносителем, но и активным реагентом в физико-химических реакциях. Благодаря таким уникальным свойствам как высокая энтальпия, окислительно-восстановительная среда, экологичность, широкая доступность пароводяная плазма перспективна в различных технологических процессах энергетики, машиностроения, плазменном напылении и т.д. [1].

Аномально высокая удельная теплоёмкость воды обеспечивает плазме водяного пара высокую энтальпию, которая почти на порядок выше, чем у воздушной, азотной, кислородной и аргоновой и немного ниже лишь водородной. К числу других достоинств плазмы водяного пара следует отнести отсутствие вредных окислов азота при работе плазмотрона.

В этой связи разработка конструкции генератора водяной плазмы с составными трубчатыми электродами является актуальной проблемой [2]. В таком плазмотроне не требуется защитный газ, он менее чувствителен к повышению давления и генерирует однородную пароводяную плазму (без других газовых включений).

Работа выполнялась в лаборатории электротехнологий Института Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, а также на кафедре АЭТУ Новосибирского государственного технического университета. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры АЭТУ НГТУ.

Основу исследуемого однокамерного плазмотрона составляют два полых цилиндрических электрода (1 и 2) ступенчатой формы, разделённых изолятором (рис. 1). В изоляторе расположено кольцо закрутки 3, имеющее два ряда тангенциальных отверстий. Через один ряд в плазмотрон на стадии запуска поступает подогретый до 160 °С воздух, через другой – водяной пар с температурой 250 – 300 °С. Чтобы исключить конденсацию пара на охлаждаемой поверхности внутреннего электрода, необходимо поддерживать температуру внутренней стенки 100 – 150 °С.

Достигается это косвенным охлаждением медного электрода путём применения трубы из нержавеющей стали на всей длине электрода.

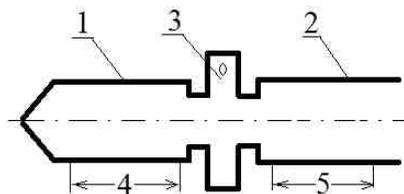


Рис. 1. Схема пароводяного плазмотрона

Внутренний электрод служит анодом, а внешний электрод служит катодом. Длины зон основной выработки электродов (4 и 5) зависят от многих факторов, один из основных которых есть тип самой конструкции составного электрода. Изменяя конструкцию электрода, можно изменять коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности электрода в достаточно широких пределах, не изменяя при этом расход охлаждающей жидкости.

Разработка требуемой конструкции составного трубчатого электрода с минимальной эрозией является сложной инженерной задачей. Для её успешного решения необходимо рассчитать оптимальные характеристики самого рабочего режима плазмотрона, которые зависят от многих факторов, а именно: от расхода рабочей среды – теплоносителя в рабочую камеру плазмотрона; от расхода охлаждающей жидкости; от формы охлаждающей поверхности электрода; от вводимой мощности дуги в пароводяной плазмотрон.

Одной из основных целей проведения теплового расчёта составного электрода является отыскание оптимальных условий охлаждения медного электрода для достижения на его рабочей поверхности температуры 100 – 150 °С. Известно, что с повышением температуры анода от 100 до 300 °С удельная эрозия электрода возрастает от $2 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл. Поэтому задача снижения температуры внутренней стенки электрода будет определять длительность его работы.

Интерфейс ANSYS позволяет эффективно назначать материалы и их свойства различным слоям конструкции. ANSYS предлагает большую библиотеку конечных элементов, которые могут использоваться для создания желаемой модели. Также на выбор пользователя предлагается большой набор нагрузок для задания граничных условий. Решатели ANSYS обеспечивают основу для получения высокоточных результатов анализа, используя которые можно получить оптимальные параметры конструкции электрода.

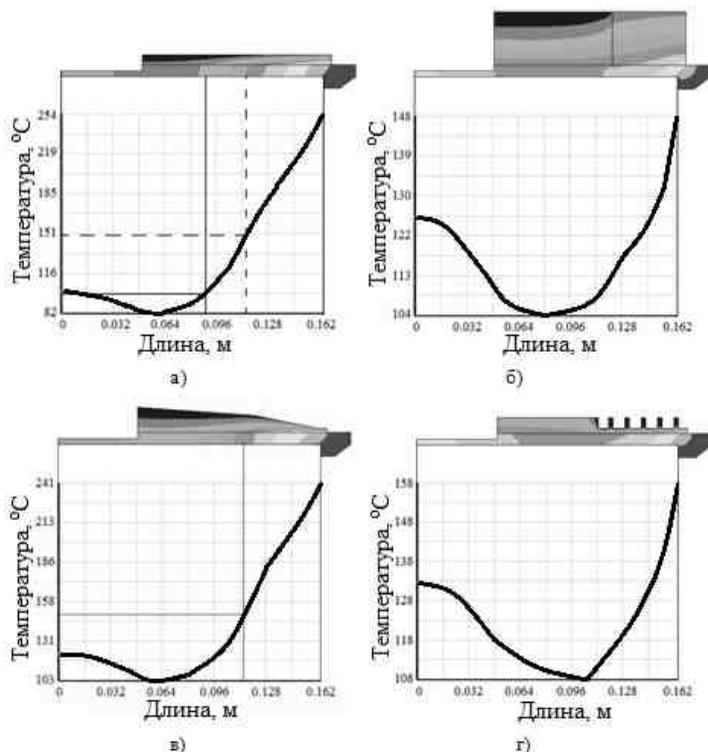


Рис. 2. Некоторые схемы составных электродов

На рис. 2а представлено численное решение составного электрода, когда обе цилиндрические стенки постоянны на всей длине. Основной недостаток данной конструкции, как видно из графика, это то, что она не обеспечивает требуемый температурный режим на внутренней поверхности электрода. Участок, температура которого входит в диапазон 100 – 150 °С очень мал (на графике отмечен сплошной и пунктирной линиями). Это приводит к высокой эрозии электрода.

На рис. 2б представлен случай, когда второй слой электрода – комбинированный. В более нагруженной области второй слой сделан из алюминия, а в менее нагруженной – из нержавеющей стали. Для достижения требуемого температурного режима толщина внешнего слоя потребовалась намного толще, чем для случая а). В результате, как видно из графика, можно добиться требуемого распределения температуры на внутренней поверхности электрода. Недостатком данного варианта

являются трудности в эксплуатации, так как дополнительные стыковочные места приводят к усложнению конструкции плазмотрона в целом.

Интересным представляется случай, когда второй слоя выполнен в форме конфузора (рис. 2в). Но как показывает проведённый численный расчёт данного типа, он также не обеспечивает требуемое температурное распределение на внутренней поверхности электрода. Видно, что изменение толщины второго слоя относительно слабо влияет на температурный режим внутри разрядной камеры.

На рис. 2г представлен наиболее оптимальный тип составного внутреннего электрода, так как он учитывает все недостатки вышеописанных вариантов. На внешней поверхности второго слоя в наиболее нагруженной области нарезана прямоугольная резьба. Такой конструктивный приём приводит к локальной турбулизации охлаждающей жидкости, что в свою очередь приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи в несколько раз и как итог к более интенсивному охлаждению составного электрода. При этом в менее нагруженной области поток воды остаётся ламинарным и отток тепла от второго слоя не такой значительный. Такая ситуация позволит фиксировать требуемую температуру на внутренней медной поверхности электрода и оптимизировать его удельную эрозию.

Библиографический список

1. **Электродуговые** генераторы термической плазмы / М.Ф. Жуков [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
2. **Электродуговой** плазмотрон для нагрева водяного пара / А.С. Аньшаков [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – № 6. – С. 761 – 763.

К.Е. Гежа, асп., А.В. Замосковцев, инж., А.С. Колупаева, студ.;
рук. А.И. Алиферов, д.т.н., профессор,
В.А. Сеницын, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ПО ДЛИНЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Высокотемпературные и среднетемпературные электропечи сопротивления непрерывного действия (ЭПСНД) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности: электротехнической и авиаци-

онной, инструментальной и станкостроительной, автомобильной и тракторной и др. Во многих случаях достижение требуемых технико-экономических показателей удается достичь в результате кропотливой отладки электрического режима каждой тепловой зоны печи. А так как число тепловых зон может достигать $5 \div 10$, то процедура их взаимной настройки в процессе ведения технологического процесса может быть сложной, трудоемкой и весьма дорогостоящей, учитывая идущий при этом технологический брак. Основной из причин этого является то, что при традиционных методах проектирования и расчета распределения мощности по длине электропечи не учитывается тепловое взаимовлияние тепловых зон друг на друга [1, 2, 3]. Нерациональное распределение мощности по длине электропечи приводит к неодинаковому, нерасчетному тепловому режиму нагревательных элементов по зонам печи и повышает рабочие нагрузки на коммутационную аппаратуру (контакторы) в системе позиционного регулирования температурного режима, что в целом ухудшает надежность эксплуатации ЭПСНД.

В основе традиционных инженерных расчетов нагревательных систем средне- и высокотемпературных электропечей сопротивления положены методы радиационного теплообмена, учитывающие переизлучение в системе «нагревательный элемент – садка». Эти методы достаточно точно оценивают параметры электронагревателей, расположенных в ЭПСНД, имеющих значительную длину тепловых зон. В электропечах с короткими тепловыми зонами возможно существенное тепловое взаимодействие между нагревательными элементами, участками садки и футеровки, расположенными в различных зонах, которое может оказывать значительное влияние на тепловой и технологический режимы электропечи. Поэтому его необходимо учитывать при проектировании систем нагревательных элементов подобных печей.

С целью исследования таких взаимовлияний, была разработана математическая модель, в основу которой положен зональный метод расчета радиационных потоков в рабочей камере электропечи в прямой постановке с решением сопряженной задачи теплообмена на внутренней поверхности боковой стенки футеровки.

Решение прямой задачи теплообмена излучением сводится к определению результирующих потоков на поверхности тел, участвующих в теплообмене, по известной величине температуры поверхностей.

В качестве объекта исследования была выбрана пятizonная высокотемпературная ЭПСНД, имеющая прямоугольную форму рабочей камеры. Мощность электропечи распределена в пяти тепловых зонах, уменьшаясь от загрузочного окна к разгрузочному.

В практике исследования теплообмена излучением в замкнутых системах, образованных непрозрачными поверхностями произвольной конфигурации, наиболее широкое применение получил зональный метод в силу его высокой эффективности [4, 5]. В предположении этого метода всю замкнутую поверхность верхнего полупространства печи необходимо было разбить на « n » расчетных зон, в пределах которых температура и радиационные характеристики поверхности теплообмена являются постоянными. При таком условии поверхность замкнутого пространства, образованного поверхностями садки, сводовых нагревателей, футеровки боковых и торцевых стен, удобно разбить на расчетные зоны, ограничивая их размерами тепловых зон печи. На рис. 1 показано расположение расчетных зон и тепловых зон печи (I ÷ V – номера тепловых зон; I – зона максимальной мощности; V – зона минимальной мощности; 1 – 5, 6 – 10, 11 – 20, 21 – 22 – номера расчетных зон поверхностей нагревателей, садки, боковых стен футеровки, торцевых стен футеровки, соответственно). Таким образом, для пяти тепловых зон число расчетных зон составило двадцать две ($n = 22$).

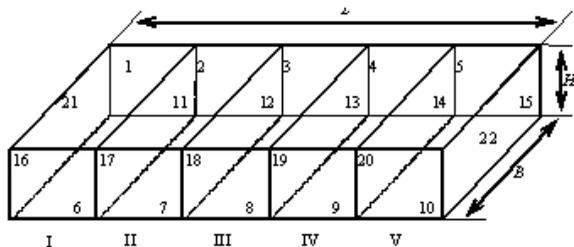


Рис. 1. Разбиение камеры пятизонной электропечи сопротивления непрерывного действия на поверхностные зоны: 1 – 5 – поверхности нагревателя; 6 – 10 – поверхности садки; 11 – 20 – боковая поверхность футеровки; 21, 22 – торцы

Моделирование тепловых процессов выполнялось при следующих допущениях: а) нагревательный элемент сплошной и площадь его равна площади внутренней поверхности футеровки свода в пределах одной тепловой зоны; б) температура каждой расчетной зоны постоянна и определяется: для каждого участка садки – технологическим режимом ее нагрева, для футеровки и нагревателя – их конструктивными особенностями; в) степень черноты в пределах одной расчетной зоны постоянна.

На рис. 2 – 3 представлены зависимости результирующих потоков на поверхности садки $E_{рез с}$ и нагревателей $E_{рез н}$ от отношения ширины камеры B к расстоянию между нагревателем и садкой H при отношении длины печи L к H (см. рис. 1), равном $L/H = 8$.

Из графиков видно, что наиболее существенное влияние переизлучение в камере с ростом отношения В/Н оказывает на требуемую мощность нагревательного элемента ($P_n = E_{рез} \cdot F_{нз}$) и полезный тепловой поток на садку ($P_{пол} = E_{рез} \cdot F_c$), которые с повышением В/Н стремятся в 1-й, 2-й и 3-й тепловых зонах к некоторому предельному значению.

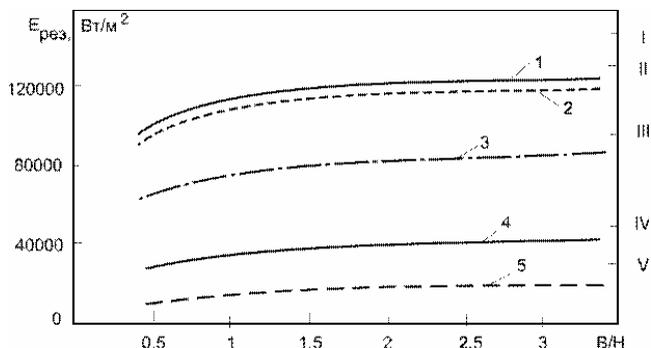


Рис. 2. Зависимость результирующего потока на поверхности садки от отношение ширины печи В к расстоянию между нагревателем и садкой Н. I, II, III, IV, V – номера тепловых зон, полученных по инженерной методике

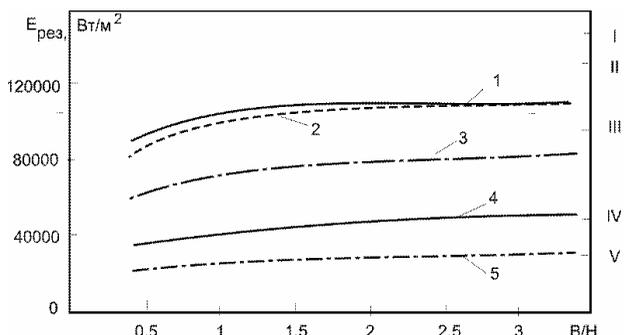


Рис. 3. Зависимость результирующего потока на поверхности нагревателя от отношения В/Н. I, II, III, IV, V – номера тепловых зон (см. рис. 2).

Перераспределение мощности, получаемое в различных зонах, качественно соответствует процессам, наблюдаемым в реальных ЭПСНД.

На рис. 2 и 3 показаны уровни поверхностной мощности нагревателей, которые рассчитаны для всех пяти зон по стандартной инженерной методике. Эта же величина плотности теплового потока равна полезной плотности потока падающей на поверхность садки.

Таким образом, в 1-й, 2-й и 3-й зонах величины требуемых мощностей нагревателя и полезного потока в садку – меньше рассчитанной по инженерной методике на $10 \div 27$ %. В пределах 4-й и 5-й зон требуемая мощность нагревателей будет на $5 \div 15$ % больше рассчитанной по инженерной методике (I, II, III, IV, V – позиции рис. 2 – 5), а требуемая полезная мощность на садке будет меньше.

Это значит, что суммарная мощность, закладываемая в печь по стандартной методике, больше на 12 %, чем требуется, если мощность правильно распределить по длине печи.

Таким образом, если качество нагрева садки в обоих случаях распределения мощности (при $P_{н\Sigma 1}$ и $P_{н\Sigma 2}$) будет одинаково, то при распределении мощности по длине печи, выполненном с учетом переизлучения в камере печи, получается экономия энергии на 12 %. Если при нагреве садки в печи, рассчитанной по стандартной методике, будет брак нагрева садки, то требуется перенастройка регуляторов всех зон печи так, как описано выше. А это приведет к уменьшению срока службы нагревателя.

Библиографический список

1. **Свенчанский, А.Д.** Электрически промышленные печи / А.Д. Свенчанский. – М.: Энергия, 1975.
2. **Общепромышленные** электропечи непрерывного действия / А.В. Арендарчук [и др.]. – М.: Энергия, 1977.
3. **Чередниченко, В.С.** Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления / В.С. Чередниченко, А.С. Бородачев, В.Д. Артемьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
4. **Мучник, Г.Ф.** Методы теории теплообмена / Г.Ф. Мучник, И.Б. Рубашов. – М.: Высшая школа, 1974.
5. **Блох, А.Г.** Теплообмен излучением / А.Г. Блох. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

*А.Ю. Журова, студ.; рук. Л.П. Горева, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНОГО ТОКОПОДВОДА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) питаются через особые печные трансформаторы, поэтому в главной цепи различают первичную и вторичную стороны. Первичная цепь состоит из последовательно соеди-

ненных проводов и аппаратов высокого напряжения, дросселя и первичной обмотки печного трансформатора. Вторичная цепь состоит из последовательно соединенных вторичной обмотки трансформатора, токопроводов короткой сети, электрода и, наконец, электрических дуг. Электрические дуги сталеплавильных печей горят между нижними концами электродов и поверхностью металла. Таким образом, электрические цепи дуговых электропечей трехфазные, трехпроводные без нулевого провода. Напряжение первичной стороны составляет 35 кВ, поэтому даже при больших мощностях печного трансформатора токи первичной цепи сравнительно малы. В последнее время проявилась тенденция увеличения напряжения вторичной цепи до 1000 В и выше, а токи в них достигают 100 кА.

Расчеты токов, напряжений и мощностей в цепях дуговых электропечей представляют большой практический интерес, так как результаты этих расчетов используются при проектировании и эксплуатации печей. На основании этих расчетов устанавливается самый выгодный режим работы печи, выбираются установки и производится настройка автоматических регуляторов мощности, релейной защиты печи, проектируется подводящая сеть. Эти расчеты (в зависимости от их целей) могут выполняться разными методами с разной степенью точности.

Наиболее точные результаты могут быть получены при применении методов расчета с учетом несинусоидальности напряжений на дугах. Однако такие расчеты сложны, особенно для несимметричных цепей. Получаемое при этом уточнение невелико. Учет несинусоидальности необходим в тех случаях, когда требуется определить влияние высших гармонических составляющих тока на параметры цепи. Достаточную для практики точность расчетов можно получить и без учета несинусоидальности напряжения дуги, что позволяет применить для симметричных цепей известные в электротехнике методы расчета. Вместе с тем расчеты несимметричных цепей с дугами представляют наибольший практический интерес, в том числе в связи с таким явлением, как перенос мощности.

В ДСП при симметричном питающем напряжении, равных токах и активных сопротивлениях фаз активные мощности дуг оказываются, тем не менее, различными. Это вызывается несимметрией короткой сети (рис. 1), неодинаковой взаимной индуктивностью фаз (крайних друг с другом и крайних со средней) и приводит к явлению переноса мощности из одной крайней фазы в другую. В результате при равной мощности фаз сети одна из дуг будет иметь пониженные напряжения и мощность (ее называют «мертвой» фазой), а другая, наоборот, повышенные («дикая» фаза).

Это явление почти не заметно у печей малой мощности, но является существенным для крупных печей. При этом, хотя суммарная активная мощность печи в целом остается неизменной, перенос мощности отрица-

тельно влияет на технико-экономические показатели печи. Увеличение производительности «дикой» фазы не полностью компенсирует снижение производительности «мертвой» фазы, так как резко ухудшается равномерность выделения тепла по объему печи. Кроме того, против «дикой» фазы усиливается износ футеровки и увеличивается расход электрода этой фазы.

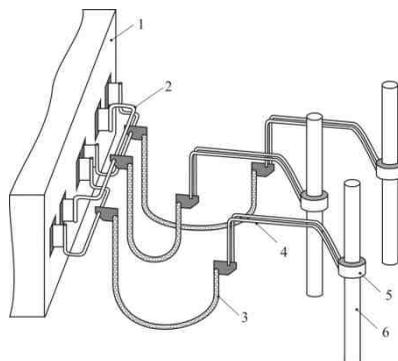


Рис. 1. Вторичный токоподвод ДСП: 1 – печной трансформатор; 2 – мост расшихтовки; 3 – кабельная гирлянда; 4 – трубошины электрододержателя; 5 – зажим электрода; 6 – электрод

Для уменьшения несимметрии вторичного токоподвода применяют триангуляцию, т.е. проектируют вторичный токоподвод таким образом, чтобы в перпендикулярном сечении оси проводников фаз располагались по вершинам равностороннего треугольника.

При работе печи на конструктивную несимметрию могут накладываться эксплуатационные моменты. Например, если электроды в фазах расходуются неравномерно, и равенство рабочих частей электродов не обеспечивается своевременным перепуском электродов, то плюс к несимметрии сопротивлений электродов возникает нарушение триангулированной транспозиции проводников других участков вторичного токоподвода, в наибольшей степени это касается трубошин электрододержателей (см. рис. 1). Таким образом, достичь полной симметрии вторичного токоподвода на практике не удастся. Поэтому возникает необходимость оценить влияние этого фактора на электрические характеристики установки.

Для решения этой задачи, была применена модель трехфазного несимметричного контура с дугами (рис. 2) [1]. Уравнения для нахождения токов и напряжений на дугах в трехфазном несимметричном электропечном контуре составляются на основе эквивалентной электрической схемы замещения дуговой электропечи.

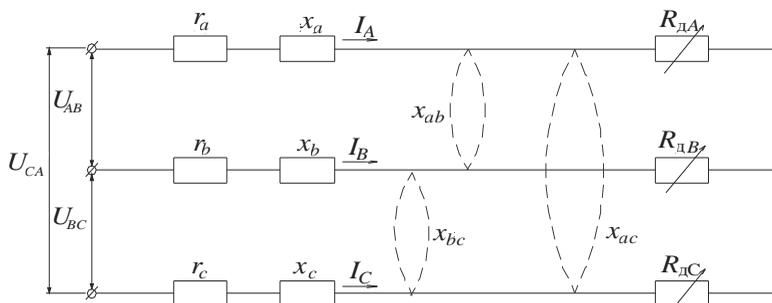


Рис. 2. Схема замещения электрической цепи трехфазной дуговой электропечи

Для этой схемы $Z_a = r_a + jx_a$; $Z_b = r_b + jx_b$; $Z_c = r_c + jx_c$ – сопротивления токоподвода; x_{ab} , x_{bc} , x_{ca} – взаимные индуктивные сопротивления между фазами, $R_{дА}$, $R_{дВ}$, $R_{дС}$ – сопротивления дуг.

Математическая модель трехфазного несимметричного электропечного контура с дугами представляет собой систему нелинейных уравнений третьего порядка. Для ее решения в данной работе был использован метод Ньютона–Рафсона. Реализация модели в *MS Excel* на языке *VBA* позволила построить электрические характеристики фаз ДСП со значениями сопротивлений вторичного токоподвода $x_1 = x_3 = 3,8$ мОм, $x_2 = 3,5$ мОм; $r_1 = r_3 = 0,43$ мОм, $r_2 = 0,4$ мОм и с вторичным напряжением на высшей ступени печного трансформатора 800 В (рис. 3). По графикам видно, что мощность, выделяющаяся в фазах, не одинакова. Очевидно наличие переноса мощности по фазам. При этом фаза С является «дикой», а фаза А – «мертвой».

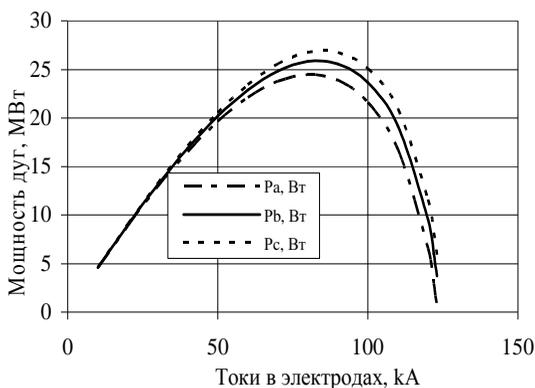


Рис. 3. Зависимость мощности дуг от токов в электродах

Проведенная работа позволила также разработать методику исследования влияния несимметрии параметров вторичного токоподвода на электрические характеристики ДСП, которая может быть полезна для разработчиков ДСП и их систем автоматического управления.

Библиографический список

1. **Марков, Н.А.** Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок / Н.А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 204 с.

*С.И. Творогов, студ.; рук. Л.П. Горева, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШИХТОВАННЫХ ПАКЕТОВ ШИН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Современные мощные руднотермические печи (РТП) в конструкции вторичного токоподвода имеют жесткий неподвижный участок (рис. 1). Зачастую он является самым протяженным из всех участков короткой сети.

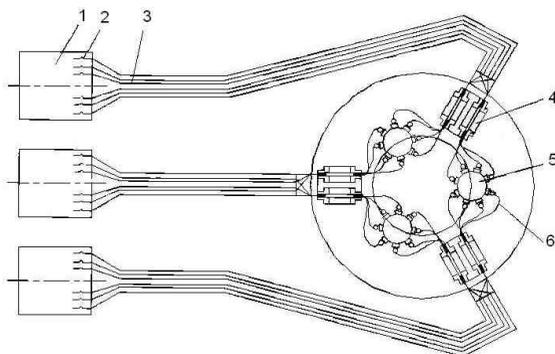


Рис. 1. Схема цепи электропитания РТП: 1 – трансформатор; 2 – компенсаторы; 3 – жесткий токоподвод; 4 – гибкий токоподвод; 5 – электрод; 6 – трубки электродержателя

Основными условиями, которым должна удовлетворять короткая сеть электрической печи, являются: наименьшая длина, простран-

венная симметрия контуров фаз, наименьшая площадь, охватываемая контуром фазы, правильный выбор проводников (с учетом условий их работы) и рациональное использование их сечения, наиболее рациональная транспозиция проводников, преследующая цель равномерной загрузки их током и получения одинаковых электрических параметров всех фаз.

Соблюдение этих условий позволяет мощность, получаемую из питающей сети, использовать с высоким электрическим КПД и высоким коэффициентом мощности, а в ванне печи равномерно распределить ее между фазами (или электродами), что является основным и наиболее важным требованием технологии.

Параметры короткой сети оказывают большое влияние на технико-экономические показатели работы печи: коэффициент мощности, симметрию нагрузки фаз, удельный расход электроэнергии, электрический к.п.д. и т.д. По проводникам короткой сети протекают весьма большие токи промышленной частоты, которые создают вокруг проводников сильные магнитные поля. Вследствие этого большое значение приобретают такие явления, как поверхностный эффект, эффект близости, неравномерное распределение тока по отдельным проводникам, перенос мощности между отдельными проводниками и фазами, потери энергии в металлических конструкциях и др.

С целью снижения индуктивного сопротивления жесткие участки коротких сетей (позиция 3 рис. 1) по возможности выполняются сбиблированными. На практике библиция осуществляется перешихтовкой проводников в пакете. Один из вариантов конструкции шинного моста РТП – ряд прямоугольных шин, обращенных друг к другу широкими сторонами. На рис. 2 приведен вариант перешихтовки проводников в шинопакете прямоугольного сечения.

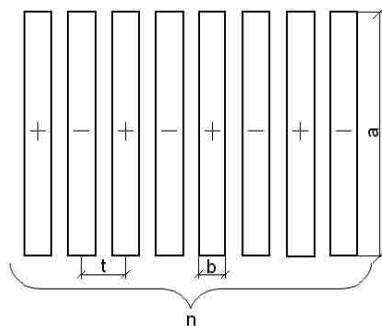


Рис. 2. Вариант перешихтовки проводников в шинопакете прямоугольного сечения

Основная методика расчета индуктивного сопротивлений таких шинопакетов изложена в [1]. Она представляет собой набор сложных формул, с использованием табулированных функций и номограмм.

В данной работе эта методика была реализована в *MS Excel* на языке *VBA*. Разработанная программа позволяет рассчитывать активное и индуктивное сопротивление шихтованных пакетов руднотермических печей и анализировать влияние конструктивных решений этого участка токоподвода на уровень несимметрии его электрических параметров. Например, конструктивно обусловлен тот факт, что длина шинопакета средней фазы меньше длины шинопакета крайней фазы, а значит, на этом участке закладывается несимметрия токоподвода в целом (см. рис. 1). Но индуктивное сопротивление зависит не только от длины проводников, но и от геометрии сечения. Если увеличить расстояние между шинами в пакете t , то индуктивное сопротивление пакета будет увеличиваться, значит можно сделать сопротивление шинопакета средней фазы равным индуктивному сопротивлению крайней фазы.

Для примера были рассмотрены шинопакеты крайней и средней фазы установки РКО-16,5 (руднотермическая круглая открытая, мощностью 16,5 МВА). В таблице приведены параметры шинопакетов крайней и средней фаз.

Таблица 1. Параметры шинопакета установки РКО-16,5 [1]

Фаза	Длина, м	Толщина шин b, м	Высота шин a, м	Межосевое расстояние t, м	Кол-во шин m	Индуктивное сопротивление шинопакета, мОм
Крайняя	14,3	0,012	0,3	0,027	6	0,11
Средняя	4,6	0,012	0,3	0,027	6	0,05

Как правило, расстояние между шинами делают минимальным, оно должно удовлетворять Правилам Устройства Электроустановок. Максимальное расстояние ограничено только приемлемостью габаритов конструкции. Расчеты показали, что при увеличении расстояния между шинами в средней фазе до 0,09 м ее индуктивное сопротивление становится равным индуктивному сопротивлению крайней фазы. Таким образом, разработанная программа позволяет определять геометрические параметры шинопакетов фаз, обеспечивающие их симметрию.

Библиографический список

1. **Короткие** сети и электрические параметры дуговых электропечей: справ. изд. / Я.Б. Данцис [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.

*Т.В. Гонжара, студ.; рук. Л.П. Горева, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЕЙ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Традиционная компоновка классической конструктивной схемы трехфазной дуговой сталеплавильной электропечи в своей первооснове содержит электромеханические противоречия, заключающиеся в невозможности полного симметрирования системы из-за одностороннего расположения относительно ванны печи источника питания и электрододержателей. Это, как известно, определяет конкретный уровень несимметрии токоподводов, неравномерность распределения вводимой мощности по фазам, различные механические характеристики конструктивных исполнений крайних фаз относительно средней фазы и т.д. На эти процессы накладываются межфазные электродинамические взаимодействия в системе токоподводов, которые определяются протекающими по фазам токами, пространственным расположением токоведущих частей конструкции и механическими характеристиками несущих конструкций каждой фазы. Электродинамические колебания рабочего конца графитовых электродов в свою очередь влияют на длину дугового промежутка, сопротивление дуги и токи, протекающие по фазам. При этом внутренние взаимосвязи в трехфазной несимметричной электродинамической системе ДСП обеспечивают наличие обратных связей не только в каждой конкретной фазе, но и взаимное влияние соседних фаз на рабочие режимы конкретной фазы электропечи.

Обобщенная схема ДСП как электромеханической системы (рис. 1) отражает комплексный подход к решаемой задаче. Согласно этой схеме, трансформатор является независимым источником питания, обеспечивающим необходимые электрические режимы работы ДСП. Параметры электрической дуги определяют при заданных напряжениях и параметрах вторичных токоподводов фаз токи в дугах I_d . Между элементами вторичного токоподвода действуют электродинамические силы, которые определяются величинами фазных токов. Так как элементы вторичного токоподвода жёстко установлены на электрододержателе, являющемся частью механической системы ДСП, электродинамические силы приводят к деформации всей механической системы, а, следовательно, к изменению координат конца электрода Δx , Δy , Δz . А это приводит к изменению длины дуги Δl_d . Контур замкнулся. Таким образом, в электромеханиче-

ской системе ДСП присутствует обратная связь, соединяющая выход системы с её входом, которая состоит в том, что движения электрода оказывают влияние на силу тока дуги и на электродинамические усилия. Такая система при определенных условиях способна генерировать колебания, т.е. является автоколебательной. Частоту этих колебаний задает механическая система электрододержателей в соответствии со своими динамическими свойствами: собственными формами и частотами [1].

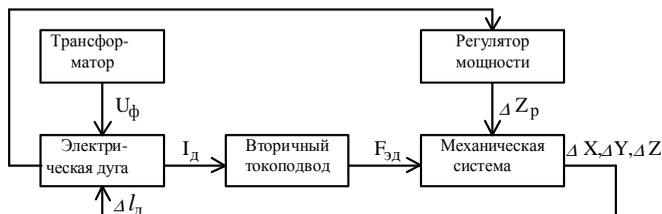


Рис. 1. Обобщенная схема ДСП как электромеханической системы

Система электрод–электрододержатель представляет собой механическую систему с распределенными параметрами. В общем случае такая система обладает бесконечным числом степеней свободы, а значит и бесконечным рядом собственных форм колебаний. Каждой форме соответствует определенная частота и скорость затухания колебаний. В общем случае свободные колебания системы можно представить суммой собственных колебаний с различными формами, имеющими свои частоты и скорости затухания. Относительная доля каждой формы колебаний в общем движении определяется начальными условиями, при которых возникли свободные колебания [2].

Располагая достаточной информацией относительно распределения масс и жёсткостей системы, можно рассчитать ее собственные частоты. В тех случаях, когда конструкция допускает большое разнообразие типов деформации, такой вопрос может оказаться очень трудоемким. Однако не обязательно знать все частоты. Интерес представляют лишь те частоты, значения которых лежат в некотором диапазоне, во многих случаях достаточно лишь знать низшие частоты.

В данной работе применен эффективный метод расчета деформаций – метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий свести систему дифференциальных уравнений статического напряженно-деформированного состояния механической системы с бесконечным числом степеней свободы к системе линейных уравнений, отражающих напряженно-деформированное состояние отдельных точек непрерывной конструкции, а значит системы с конечным числом степеней свободы [3].

На рис. 2 представлен вариант расчетно-модельной схемы системы электрод–электрододержатель. Закрепление стойки на штоке гидроцилиндра и в наплавляющих роликах моделируется узлом 1 в точке, соответствующей верхнему уровню роликов. Закрепление стойки в роликах не является абсолютно жестким и может наряду с другими факторами влиять на податливость торца электрода. Поэтому в узле 1 запрещено смещение стойки по осям координат, но допускается ее кручение и наклон стойки.

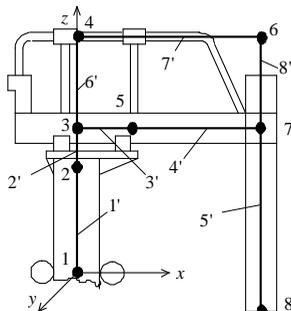


Рис. 2. Система электрод–электрододержатель и ее расчетная схема: 1...8 – узлы; 1'...8' – конечные элементы

Для такой системы была разработана программа расчета собственных форм и частот для электрододержателя крайней фазы установки ДСП-100И6. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные частоты колебаний системы электрод–электрододержатель крайней фазы дуговой сталеплавильной электропечи ДСП-100И6, Гц

Наименование деформации	С электродом			Без электрода	
	Положение стойки			Положение стойки	
	Нижнее	Среднее	Верхнее	Нижнее	Среднее
Кручение стойки	2.75	2.12	1.52	3.7	–
Изгиб стойки в плоскости <i>ZOX</i>	–	3.45	2.51	6.37	4.22

Полученные результаты раскрывают природу фликер-эффекта (наличие низкочастотных составляющих тока и напряжения в питающей сети), генерируемого дугowymi сталеплавильными электропечами в процессе работы.

Библиографический список

1. Горева, Л.П. Математическая модель электродинамических взаимодействий в электромеханической системе дуговой сталеплавильной электропечи / Л.П. Горева, Р.А. Бикеев, Д.С. Власов // Электромеханика: Изв. вузов. – 2012. – № 6. – С. 46 – 49.

2. **Бишоп, Р.** Колебания: пер. с англ. / под ред. Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1986.

3. **Бате, К.** Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982.

*А.Ю. Ермошкина, студ.; рук. Л.П. Горева, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ НАГРЕВЕ

В данной статье рассматривается задача определения активного и индуктивного сопротивлений профилей круглого сплошного сечения из ферромагнитного материала. Решение этой задачи актуально для расчета параметров установок электроконтактного нагрева.

Электроконтактный нагрев может осуществляться постоянным и переменным током со стабилизированным источником напряжения или тока. В промышленном производстве предпочтение обычно отдают переменному току промышленной частоты, при котором, во-первых, меньше стоимость электротехнического оборудования, чем на постоянном токе, во-вторых, обеспечивается достаточная равномерность нагрева изделий. Однако на переменном токе в проводниковых материалах возникают специфические эффекты (поверхностный, близости, краевой), приводящие, особенно в ферромагнитных проводниках, к неравномерному распределению плотности тока по сечению, а значит, существенно усложняется задача определения активного и индуктивного сопротивления нагреваемых электроконтактным способом изделий. При этом магнитная проницаемость нагреваемого объекта является функцией напряженности магнитного поля.

В литературе [1] рассматривается расчет сопротивлений ряда профилей. Приведенные в ней результаты получены численным решением методом конечных разностей системы уравнений Максвелла для конкретных граничных условий, свойств материала и геометрии проводника. В этой же работе приведены обобщенные результаты, которые позволяют вычислить активное и внутреннее реактивное сопротивления ферромагнитных профилей, но для конкретных исходных данных.

В настоящее время получил широкое распространение метод численного моделирования с использованием специализированного про-

граммного обеспечения. В данной работе результаты были получены с использованием системы численного моделирования ANSYS. Преимущество этому способу придает возможность использования алгоритмического языка в процессе создания модели и расчета по ней. Это позволяет параметризовать задание исходных данных при построении модели и организовывать циклические процессы расчетов множества вариантов. Еще одним ощутимым преимуществом является возможность вычисления полного, а не только внутреннего индуктивного сопротивления. Дружественный интерфейс при решении задачи и просмотре результатов тоже играет не последнюю роль при выборе инструмента исследования.

С целью дальнейшего обобщения результатов при исследовании были взяты широкие диапазоны входных данных. Так как рассматриваемая модель одномерна, прутки характеризовались только диаметром, трубы – внутренним диаметром и толщиной. В исследовании рассмотрены сплошные проводники диаметром $d = 0,018, 0,052, 0,11$ и $0,28$ м, трубы с внутренним диаметром $d = 0,01, 0,040, 0,07, 0,2$ и $0,4$ м с толщинами стенки $t = 0,004, 0,006, 0,02$ и $0,04$ м. Для выявления влияния электрического режима на исследуемое явление расчеты проведены для действующих значений тока 1, 5, 10, 50 и 100 кА. Эти значения лежат в реальном диапазоне силы тока при электроконтактном нагреве, интенсивность тепловыделения при котором определяется по закону Джоуля–Ленца. На рис. 1 представлены зависимости активного и индуктивного сопротивлений сплошного круглого профиля в зависимости от силы тока для различных значений диаметра проводника. Магнитные свойства при расчетах соответствовали магнитной стали Ст10.

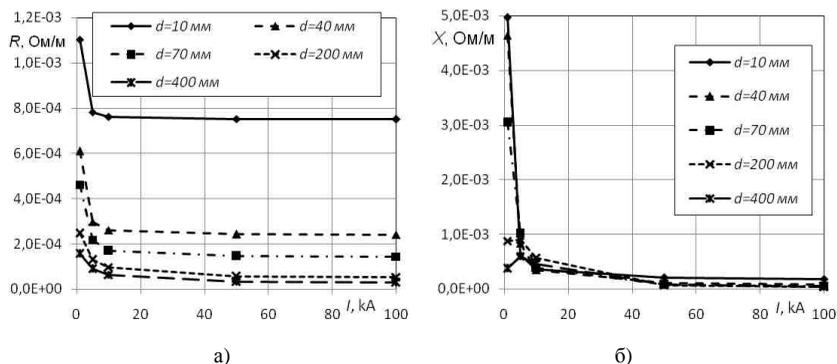


Рис. 1. Зависимость активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений 1 м ферромагнитного профиля круглого сечения от силы тока I промышленной частоты при различных значениях диаметра d

Из графиков рис. 1 видно, что сопротивление по мере роста тока уменьшается, достигая некоторого минимального значения, которое с дальнейшим ростом тока практически не изменяется. Это связано с характером зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Для профилей трубчатого сечения характер зависимостей рис. 1 аналогичен.

Полученные результаты были сопоставлены с результатами аналогичных расчетов, приведенных в литературе [1].

На графиках рис. 2 наглядно представлен результат сравнения для активных сопротивлений.

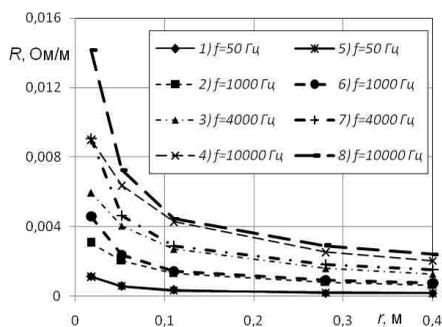


Рис. 2. Результаты расчета активного сопротивления сплошного круглого ферромагнитного профиля при разных частотах питающего тока аналитическим методом (кривые 1, 2, 3, 4) и численным (кривые 5, 6, 7, 8) при амплитуде тока $I = 1000$ А

В результате сравнения можно сделать вывод о том, что на промышленной частоте оба метода дают близкие результаты. Большой объем результатов позволил получить эмпирические формулы, позволяющие легко без применения специализированного программного обеспечения рассчитывать активное и индуктивное сопротивления ферромагнитных профилей при геометрических и физических исходных данных, входящих в исследованный диапазон. Для сплошного ферромагнитного проводника эти формулы, имеют вид:

$$R = 1.439 \cdot 10^{-4} \cdot r^{-0.56793} \cdot f^{0.481706} \cdot I^{-0.40237};$$

$$X = 7.8 \cdot 10^{-3} \cdot r^{-0.34059} \cdot f^{0.5023} \cdot I^{-0.49809}.$$

Библиографический список

1. Алиферов, А.И. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография / А. Алиферов, С. Лупи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.

*А.А. Кузнецов, студ.; рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Повышение требований к качеству непрерывнолитых заготовок при одновременном стремлении к расширению сортамента разливаемых сталей и увеличению производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) должно учитываться при проектировании современных высокопроизводительных машин. Качество непрерывнолитых заготовок зависит от большого количества технологических параметров литья, конструктивных параметров оборудования и т.д. Однако есть дефекты макроструктуры непрерывнолитых заготовок, связанные с кристаллизацией, усадочными и ликвационными процессами, которые не могут быть устранены даже при рациональных конструктивных и технологических параметрах. Возможность предотвращения образования или подавления развития кристаллизационных, усадочных и ликвационных дефектов многие исследователи связывают с созданием управляемого принудительного движения жидкой фазы кристаллизующегося слитка, в частности, с помощью электромагнитных сил [1].

Электромагнитное перемешивание используют для улучшения внутреннего строения заготовки (измельчение структуры, снижение степени ликвации в средней и центральной частях, уменьшение центральной пористости), для улучшения качества поверхности заготовки, снижения неметаллических включений, повышения толщины наружной плотной корочки, уменьшения количества пузырей. Представленные задачи решаются путём снижения перегрева, обламывания ветвей дендритов и создания циркуляции в жидкой сердцевине, создания потоков на поверхности металла в кристаллизаторе и улучшения условий выделения включений [2].

Назначение. Электромагнитное перемешивание (ЭМП) используется для решения двух задач:

- для улучшения внутреннего строения заготовки (измельчения структуры, снижения степени ликвации в средней и центральной частях, уменьшения центральной пористости);

- для улучшения поверхности заготовки (снижения количества поверхностных дефектов, количества неметаллических включений в поверхностном слое, повышения толщины наружной плотной корочки).

Механизм воздействия на жидкую сталь при решении первой задачи основан на снижении перегрева, обламывании ветвей дендритов и создании циркуляции металла в жидкой сердцевине. Решение второй задачи

связано с созданием потоков на поверхности металла в кристаллизаторе и улучшением условий выделения включений. В первом случае электромагнитное перемешивание осуществляется в зоне вторичного охлаждения, при этом можно создать либо вращающееся, либо бегущее магнитное поле. Во втором случае индуктор размещается в самом кристаллизаторе [3].

Установка полунепрерывной разливки стали сочетает в себе несколько зон воздействия на жидкий металл: системы ЭМП устанавливаются в кристаллизаторе (К-ЭМП), зоне вторичного охлаждения (ЗВО) и в зоне окончания затвердевания (ЗОЗ).

Особенности установки. Установка содержит различное технологическое оборудование: платформа для промковша, кристаллизатор, каретка ЭМП, тянущая каретка, рольганги, а также различные системы привода технологического оборудования, а также смазки (механического оборудования и кристаллизатора) и охлаждения (слитка и оборудования в целом).

Основной особенностью установки является конструкция и расположение статоров электромагнитного перемешивателя (ЭМП) (рис. 1).

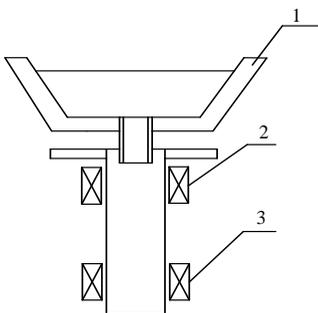


Рис. 1. Установка полунепрерывного разлива стали: 1 – Пром-ковш; 2 – ЭМП в кристаллизаторе; 3 – ЭМП в зоне вторичного охлаждения

Статор ЭМП устанавливается в расточку корпусов кристаллизатора. Внутренняя водоохлаждаемая полость корпуса кристаллизатора разделена обечайкой так, что вода, поступающая в кристаллизатор, проходит вначале через полость, занятую полюсами, охлаждая обмотку каждого полюса. После этого вода движется в каналах между медной гильзой и обечайкой на высокой скорости, охлаждая медную гильзу, в которой формируется непрерывнолитая заготовка. В зонах вторичного охлаждения и окончательного охлаждения статор ЭМП расположены непосредственно в корпусе каретки.

Статоры ЭМП, применяемые на УПНРС, являются трёхфазными статорами переменного тока (аналогичными статорам крупных асинхронных двигателей) погружного типа с непосредственным охлаждением

очищенной технической водой витков обмотки. Статоры охватывают отливаемую стальную заготовку и создают в ней вращающееся электромагнитное поле. Магнитная система статоров ЭМП имеет большой внутренний немагнитный зазор для замыкания магнитных потоков внутри статора (что отличает их от статоров асинхронных двигателей).

Электромагнит-полюс состоит из шихтованного сердечника, обмотки и кожуха. Обмотка выполнена из специального водопогружного провода с двойной изоляцией высокой электрической и механической прочности и повышенной теплостойкости. Конструкция обмотки предусматривает охлаждение водой каждого витка, для чего она разделена электроизоляционными прокладками на отдельные части. Между такими частями обмотки образованы каналы для протока воды.

Обмотки полюсов ЭМП изготовлены из водопогружного провода с повышенной механической и электрической прочностью с водонепроницаемой изоляцией. При малой толщине такой изоляции обеспечивается высокий коэффициент теплообмена между медными проводниками и технической водой, применяемой для непосредственного охлаждения. Этим достигается получение высоких значений намагничивающей силы обмотки при малом занимаемом объеме.

Заключение

Данная установка позволяет добиться наилучшего качества поверхности и макроструктуры получаемой заготовки, повышения стабильности ведения технологического процесса.

Библиографический список

1. **Системы** электромагнитного перемешивания жидкой стали на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ / В. Грачев [и др.].
2. <http://razlivka-stali.ru/filtraciya/elektromagnitnoe-peremeshivanie-i-tormozhenie.html#more>.
3. http://emchezgia.ru/vakuumnaya/17_obrabotka_stali_v_protseste_krystallizatsii.php МЧ-ЗГИА.РУ.

*Д.А. Сухов, студ., рук. М.Г. Марков, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ

Изделия из алюминия, никеля, титана, нержавеющей стали и других металлов широко применяют в производстве и жизни человека. При их

изготовлении часто используется сварка в среде защитных газов. В том числе аргонодуговая сварка [1].

Преимуществом аргонодуговой сварки считают геометрически однородный качественный шов. Шов получают без дефектов. Так же исключены шлаковые образования. Шов выдерживает большие нагрузки на изгиб, сжатие и растяжение.

Оборудование для сварки показано на рис. 1. Для сварки используется горелка, присадочная проволока, баллон с защитным газом и источник питания. В настоящее время источники питания строят на базе инвертора [2].

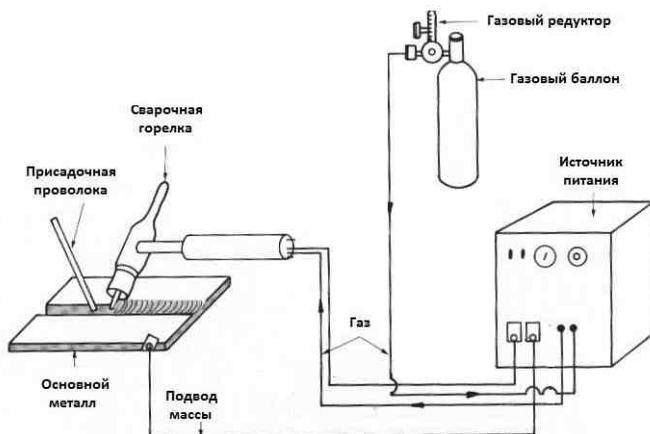


Рис. 1. Оборудование для аргонодуговой сварки

Сварочный инвертор это устройство, преобразующее входной переменный ток в постоянный. Далее с помощью транзисторных ключей постоянный ток преобразуется в переменный с частотой выше 50 кГц и подается на высокочастотный трансформатор с последующим выпрямлением. Система управления с помощью обратных связей формирует идеальные выходные характеристики для любого способа сварки. Структура инверторного источника питания (рис. 2) и устройство сварочной горелки (рис. 3) показаны на рисунках.

Сварочные источники питания должны иметь специальные внешние характеристики, обеспечивающие устойчивое горение дуги. Требуемый вид которых обеспечивается за счет особой конструкции инвертора или за счет усложнения закона управления им. Система управления сварочным инвертором может быть построена на различной элементной базе.

Наилучшее сочетание простоты схемы управления и сложности алгоритмов достигается при использовании однокристального микроконтроллера.

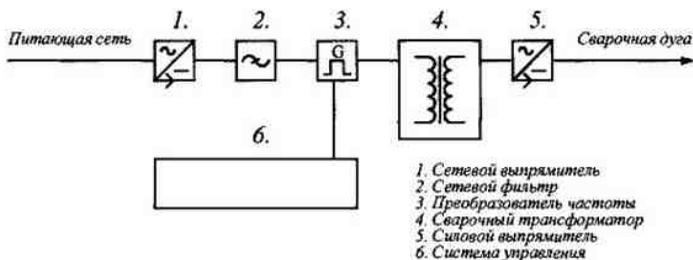


Рис. 2. Структура инверторного источника питания

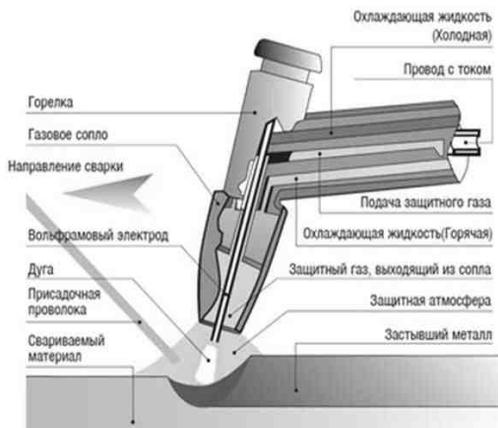


Рис. 3. Конструкция сварочной горелки

В данной работе было разработано устройство управления к инвертору для аргонодуговой сварки, составлены схемы и алгоритмы для микроконтроллера. В устройстве использован микроконтроллер среднего семейства фирмы Microchip [3]. Наиболее трудоемкой частью проекта оказалась разработка программы микроконтроллера.

При разработке проанализированы особенности управляемого объекта и выявлены его отличия от обычного сварочного инвертора. К ним относится управление подачей защитного газа и, плавное изменение тока в начале и конце процесса сварки и обеспечение пульсаций сварочного тока.

После формирования словесного описания алгоритмов управления объектом начат этап формализации. Алгоритм описан направленным графом, представленным на рис. 4.

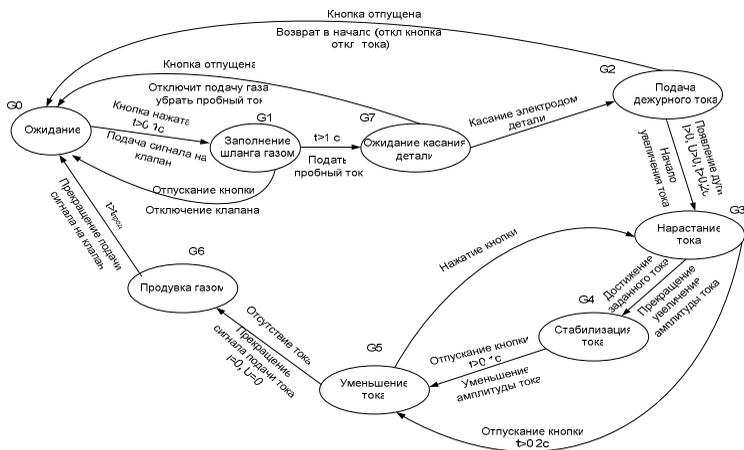


Рис. 4. Граф, описывающий алгоритм управления объектом

После составления и тщательной проверки графа переходим к следующему этапу разработки – блок схемам алгоритмов обслуживания узлов графа.

На следующем этапе разработки переходим от блок схем к тексту программы. Отдельные фрагменты разработанной программы представлены ниже.

Фрагмент программы

;Прочтем номер активного узла и перейдем на процедуру его обслуживания
movf G,w

andlw 0x0F; ограничим число переходов шестнадцатью

addwf PCL,f; прибавили к младшему байту счетчика команд номер узла графа

goto G00 ; Идем обслуживать узел графа 00

goto G01 ; Идем обслуживать узел графа 01

goto G02 ; Идем обслуживать узел графа 02

goto G03 ; Идем обслуживать узел графа 03

goto G04 ; Идем обслуживать узел графа 04

goto G05 ; Идем обслуживать узел графа 05

goto G06 ; Идем обслуживать узел графа 06

goto G07 ; Идем обслуживать узел графа 07

goto G08 ; Идем обслуживать узел графа 08

goto G09 ; Идем обслуживать узел графа 09

goto G10 ; Идем обслуживать узел графа 10

goto G11 ; Идем обслуживать узел графа 11

;Авария. У нас число узлов ограничено. Узлы 12..15 не должны использоваться. Если встретились – ошибка в программе

goto G12 ; 12 Аварийный перезапуск
 goto G13 ; 13 Аварийный перезапуск
 goto G14 ; 14 Аварийный перезапуск
 goto G15 ; 15 Аварийный перезапуск

После написания программы наступил этап отладки и тестирования. Сначала программа тестировалась в среде MPLAB.

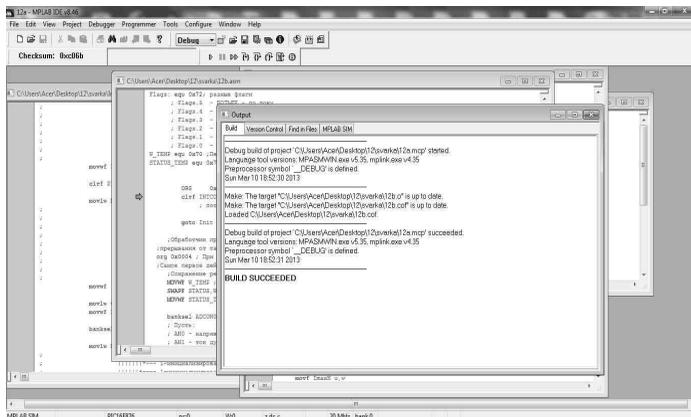


Рис. 5. Проверка программы в MPLAB

После отладки в среде MPLAB проверялась правильность взаимодействия микроконтроллера с внешними устройствами на модели инвертора, составленной в программе Proteus.

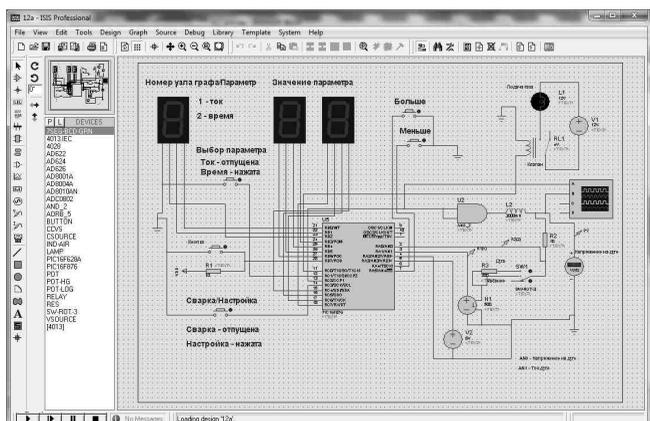


Рис. 6. Проверка программы в PROTEUS

После отладки в Proteus программа готова для прошивки в микроконтроллер.

Описанный в докладе проект системы управления источником питания для аргонодуговой сварки практически завершен и готов к внедрению в серийное производство. Его внедрение даст положительный эффект за счет снижения стоимости инвертора и повышения качества сварки.

Библиографический список

1. **Потапьевский, А.Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч. 1. Сварка в активных газах / А.Г. Потапьевский. – М., Экотехнология, 2007.
2. **Назаров, В.И.** Сварочный инвертор теория и практика / В.И. Назаров, В.И. Рыженко. – М., Оникс, 2008.
3. **Яценков, В.С.** Микроконтроллеры MicroCHIP®. Практическое руководство / В.С. Яценков. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002.
4. **Юхин, Н.А.** Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах (TIG-WIG) / Н.А. Юхин. – М.: СОУЭЛО, 2001.

*П.В. Кац, студ.; рук. Н.В. Кинит, д.т.н., профессор
(ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток)*

О ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИИ НЕКОТОРЫХ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Одним из подходов к диагностике электрических цепей (ЭЦ) явилось представление диагностируемой ЭЦ в виде многополюсника с (частично) доступными узлами, параметры которого подлежат определению. В качестве диагностической модели ЭЦ примем ее матрицу узловых проводимостей – Y_y , и, соответственно, основное уравнение для анализа электрического режима имеет вид:

$$Y_y \Delta U = \Delta J,$$

где $\Delta J = col[J_1 \dots J_n]$ – вектор (изменения) узловых источников токов;
 $\Delta U = col[U_1 \dots U_n]$ – вектор (изменения) узловых напряжений;

$Y_y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$ – квадратная матрица узловых проводимостей.

Ясно, что если в цепи нет параллельных ветвей, то, зная матрицу Y_y , легко восстановить структуру и численные значения проводимостей всех ветвей. При этом для восстановления этой матрицы необходимо провести n экспериментов, варьируя узловые источники тока и измеряя узловые напряжения.

В ряде задач диагностирования ЭЦ имеется возможность отождествить некоторые из искомых параметров между собой. Так, применительно к интегральным микросхемам (ИМС) можно принять гипотезу о том, что в рамках одной схемы некоторые неизвестные параметры равны либо пропорциональны между собой. Здесь предполагается, что элементы, изготовленные в ходе единого технологического процесса, будут иметь сходные характеристики, хотя различные партии элементов могут иметь отличия. В этом случае количество неизвестных, и, соответственно, количество необходимых измерений (или режимов) сокращается.

Возможности такой процедуры рассмотрим на примере диагностирования нелинейной ЭЦ с применением кусочно-линейной аппроксимации характеристик её нелинейных элементов. При выполнении условий разрешимости такая задача сведется к нахождению всех токов и напряжений.

Для примера диагностирования выберем ИМС (рис. 1), построенную на принципе транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

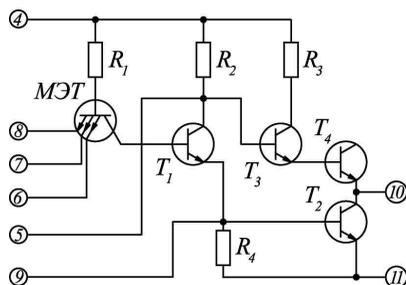


Рис. 1. Схема ТТЛ

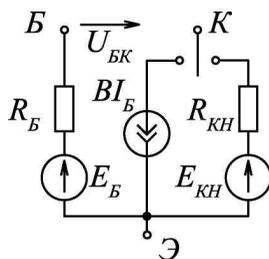


Рис. 2. Схема замещения транзистора

Испытания данной схемы представляют собой измерение её доступных параметров режима в определенных стандартных включениях. А именно: измерение входных токов и выходных напряжений при подаче на вход 1 или 0. Для дальнейших расчетов вводится схема замещения транзистора, приведенная на рис. 2.

На схеме замещения введены следующие обозначения:

$E_{КН}$, $R_{КН}$ – эквивалентные ЭДС и динамическое сопротивление в схеме замещения цепи коллектор-эмиттер в режиме насыщения,

B – статический коэффициент усиления,

E_B, R_B – ЭДС и динамическое сопротивление в цепи база-эмиттер в режиме малых либо больших токов.

Режимы работы данной схемы описываются следующими уравнениями:

$$U_{КЭ} = E_{КН} + R_{КН}I_K, I_K \leq BI_B - \text{режим насыщения,}$$

$U_{КЭ} \geq E_{КН} + R_{КН}I_K, I_K = BI_B - \text{активный режим (включает в себя режим отсечки).}$

Для примера выберем состояние ИМС, когда на все три логических входа подается высокий уровень сигнала. После некоторых преобразований, схема замещения примет следующий вид:

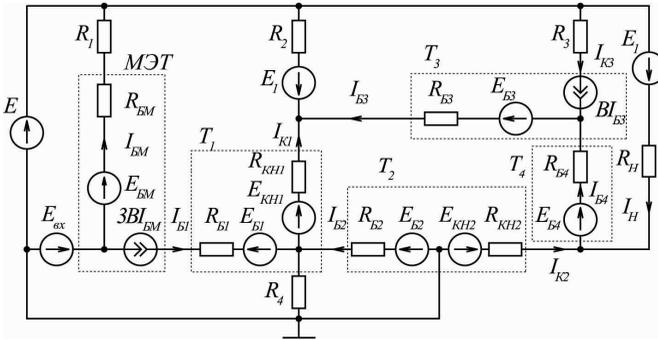


Рис. 3. Схема ТТЛ с эквивалентным замещением транзисторов

Известными считаем следующие параметры элементов ЭЦ:
 $R_1 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 15 \text{ Ом}; R_3 = 20 \text{ Ом}; R_4 = 10 \text{ Ом}; E_1 = 5 \text{ В}; E_{\text{вх}} = 5 \text{ В};$
 $R_H = 80 \text{ Ом}; B_{\text{инв}} = 0,05; E_{BM} = E_{B1} = E_{B2} = E_{B3} = E_{B4} = E_B = 0,7 \text{ В};$
 $E_{KH1} = E_{KH2} = E_{KH} = 0,1 \text{ В}.$

Составим матрицу узловых проводимостей системы с учетом управляемых источников тока:

$$Y_Y = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_{BM} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 + Y_{KH1} + Y_{B3} & -Y_{KH1} & -Y_{B3} & 0 \\ -B_{\text{инв}} & -Y_{KH1} & Y_{B1} + Y_{KH1} + Y_4 & 0 & 0 \\ 0 & -B - Y_{B3} & 0 & Y_{B3} + Y_{B4} & -Y_{B4} \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{B4} & Y_H + Y_{B4} + Y_{KH2} \end{bmatrix},$$

где $Y_n = 1/R_n$ – проводимость соответствующих элементов.

Основываясь на принципе отождествления параметров активных элементов в рамках одной схемы допустим, что параметры транзисторов

одинаковы. Это дает возможность получить следующие соотношения:
 $R_{KH1} = R_{KH2} = R_{KH}$; $R_{BM} = R_{B1} = R_{B2} = R_{B3} = R_{B4} = R_B$.

Далее представим матрицу \mathbf{Y}_y в следующем виде:

$$\mathbf{Y}_y = \mathbf{Y}_0 + Y_B \mathbf{A}_1 + B \mathbf{A}_2 + Y_{KH} \mathbf{A}_3,$$

где \mathbf{Y}_0 – матрица известных проводимостей, $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ – матрицы вхождения неизвестных в общую матрицу узловых проводимостей.

Таким образом, получим основное уравнение в виде:

$$(\mathbf{Y}_0 + Y_B \mathbf{A}_1 + B \mathbf{A}_2 + Y_{KH} \mathbf{A}_3) \Delta \mathbf{U} = \Delta \mathbf{J}.$$

Для нахождения трех неизвестных из этого уравнения в общем случае требуется проведение трех численных экспериментов. Для примера расчета реакции узловых напряжений проведем два эксперимента, подав тестовые токи, и получив соответствующие реакции узловых потенциалов:

$$\Delta \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0,05 & 0 \\ 0 & 0,05 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{U} = \mathbf{Y}_y^{-1} \Delta \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0,48 & 0 \\ -5,9 \cdot 10^{-5} & -9,9 \cdot 10^{-4} \\ 0,21 & -1,2 \cdot 10^{-4} \\ -1,19 & -20,03 \\ -2,1 \cdot 10^{-2} & -0,35 \end{bmatrix}.$$

Преобразуем основное уравнение таким образом, чтобы неизвестные остались в левой части равенства:

$$\mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{U} Y_B + \mathbf{A}_2 \Delta \mathbf{U} B + \mathbf{A}_3 \Delta \mathbf{U} Y_{KH} = \Delta \mathbf{J} - \mathbf{Y}_0 \Delta \mathbf{U}.$$

Подставив имеющиеся числовые значения, получим:

$$\begin{bmatrix} 0,49 & 0 \\ 1,20 & 20,03 \\ 0,21 & -1,2 \cdot 10^{-4} \\ -2,36 & -39,71 \\ 1,17 & 19,68 \end{bmatrix} Y_B + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 5,9 \cdot 10^{-5} & 9,9 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} B + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0,21 & -8,7 \cdot 10^{-4} \\ 0,21 & 8,7 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 \\ -2,1 \cdot 10^{-2} & -0,35 \end{bmatrix} Y_{KH} = \begin{bmatrix} 1,2 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 3,9 \cdot 10^{-6} & 0,05 \\ 3,5 \cdot 10^{-3} & 1,2 \cdot 10^{-5} \\ 0 & 0 \\ 2,6 \cdot 10^{-3} & 4,4 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}.$$

Из полученных данных видно, что было достаточно проведения лишь первого эксперимента. При этом система уравнений является избыточной. Поэтому достаточно лишь трех уравнений из пяти. В результате получим следующие значения параметров элементов: $R_B = Y_B^{-1} = 2,5 \cdot 10^{-3} = 400 \text{ Ом}$; $R_{KH} = Y_{KH}^{-1} = 1,4 \cdot 10^{-2} = 71,43 \text{ Ом}$; $B = 100,42$.

Подводя итог, следует отметить, что принцип отождествления позволяет сократить число неизвестных параметров с восьми до трех. Это позволяет решить задачу с помощью меньшего количества тестовых измерений и сократить количество требуемых вычислений. Далее, сравнивая полученные значения с ожидаемыми, можно определить, в каком состоянии находится диагностируемая ЭЦ.

Библиографический список

1. **Киншт, Н.В.** Диагностика электрических цепей / Н.В. Киншт, Г.Н. Герасимова, М.А. Кац. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
2. **Бутырин, П.А.** Диагностика электрических цепей по частям. Теоретические основы и компьютерный практикум: учеб. пособие / П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 112 с.
3. **О двух** концепциях в теории диагностики электрических цепей / Н.В. Киншт, М.А. Кац, Н.Н. Петрунько // Электричество.

*Е.Е. Пшеничникова, В.И. Новиков, М.А. Мячин, студенты;
рук. К.В. Куликов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» ДЛЯ СТЕНДОВ ЭОЭ1-С-К

В настоящее время материальная база лаборатории «Электротехника» пополнилась новыми стендами ЭОЭ1-С-К. В данной лаборатории проходят занятия студентов всех специальностей теплоэнергетического и инженерно-физического факультетов.

Исхода из этого представляется целесообразным разработку ряда лабораторных работ, проводимых на стендах. Это позволит повысить качество обучения и контроля за выполнением практических заданий, что должно привести к повышению успеваемости студентов.

Комплект типового лабораторного оборудования «Теория электрических цепей и основы электроники» предназначен для проведения лабораторного практикума по одноимённым разделам курсов «Теория электрических цепей», «Электротехника и основы электроники», «Общая электротехника» и т.п. в профессиональных высших и средних учебных учреждениях.

Комплекс лабораторных работ по курсу «Электротехника» включает в себя восемь наименований:

1. Экспериментальная проверка основных законов электротехники и изучение методов расчета линейных цепей постоянного тока.

2. Последовательное соединение элементов в цепи синусоидального тока.
3. Параллельное соединение элементов в цепи синусоидального тока.
4. Исследование трехфазной цепи при соединении звездой.
5. Исследование трехфазной цепи при соединении треугольником.
6. Определение параметров схем замещения трансформатора.
7. Исследование синхронного генератора. (Внешние и регулировочные характеристики).

8. Работа синхронного генератора параллельно с сетью.

Эти работы выбраны потому, что они закрывают важнейшие разделы курса новых ГОСах и формируют большинство профессиональных компетенций.

Наибольший интерес представляют работы связанные с исследованием электрооборудования ГРЭС и ТЭС. Это касается работы трансформаторов и синхронных генераторов.

В докладе представлены разработки по следующим лабораторным работам:

1. Определение коэффициента трансформации однофазного трансформатора; Снятие и определение характеристик холостого хода $I_0 = f(U)$, $P_0 = f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$ однофазного трансформатора; Снятие и определение характеристик короткого замыкания $I_K = f(U)$, $P_K = f(U)$, $\cos\varphi_K = f(U)$ однофазного трансформатора; Определение параметров схем замещения трансформаторов.

2. Снятие характеристики холостого хода $E_0 = f(I_f)$ трехфазного синхронного генератора; Снятие характеристики короткого замыкания $I_K = f(I_f)$ трехфазного синхронного генератора; Снятие внешней $U = f(I)$, регулировочной $I_f = f(I)$ и нагрузочной $U = f(I_f)$ характеристик трехфазного синхронного генератора; Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом точной синхронизации; Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом самосинхронизации.

*Н.В. Савельев, асп.; рук. В.В. Рожков, к.т.н., доцент
(НИУ МЭИ(ТУ), г. Смоленск)*

ПРЕИМУЩЕСТВА ТРЕХУРОВНЕВОЙ СХЕМЫ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ ГАРМОНИК

Основными потребителями электрической энергии в современном Мире являются электроприводные системы. Большая часть электроприводов представлена асинхронным электроприводом, на который прихо-

дится не менее 50 % производимой электроэнергии. Современный регулируемый асинхронный электропривод представляет собой систему, в основе которой лежит частотное регулирование. При всех достоинствах таких систем, таких как глубина регулирования частоты вращения, поддержание постоянства момента в большом диапазоне частот, качество переходных процессов, для всех систем частотного асинхронного электропривода выделяют ряд недостатков. Помимо сложности реализации алгоритмов управления, дороговизны компонентов схем и особых требований к прочности изоляции двигателей для частотного регулирования существует не менее важная проблема: влияние таких систем на питающую сеть.

Большая мощность систем частотно-регулируемого асинхронного электропривода для задач промышленности обуславливает установку мощных полупроводниковых преобразователей, оказывающих серьёзное негативное влияние на питающую сеть. На рис. 1 представлены осциллограммы сетевых напряжений и токов системы трёхуровневый преобразователь частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения – асинхронный двигатель [2]. В данном примере, полученном при помощи моделирования, сеть задана как несоизмеримо мощная по сравнению с питаемой ею нагрузкой, поэтому несинусоидальность кривых сетевых токов нагрузки никак не сказывается на форме кривых сетевого напряжения.

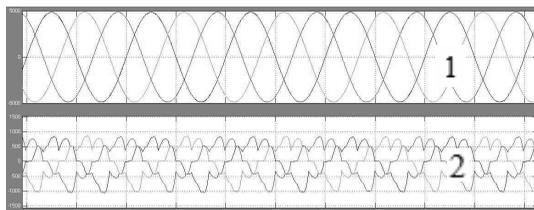


Рис. 1. Осциллограммы сетевых напряжений и токов: 1 – осциллограммы напряжений; 2 – осциллограммы токов

По рис. 1 очевидно существование гармонических искажений в кривых сетевых фазных токов, вносимых нагрузкой. В зависимости от характера нагрузки сети, мощности нагрузки по сравнению с мощностью сети вид осциллограмм может видоизменяться.

В работе проводится исследование воздействия существующего электропривода газоперекачивающего агрегата на питающую его сеть, рассматриваются варианты модернизации существующей электрической схемы преобразователя, питающего двигатель; разработана для исследований математическая модель в среде Matlab, результаты моделирования работы системы сопоставляются с осциллограммами, снятыми на реальном объекте.

Существующая силовая схема исследуемого электропривода представлена на рис. 2.

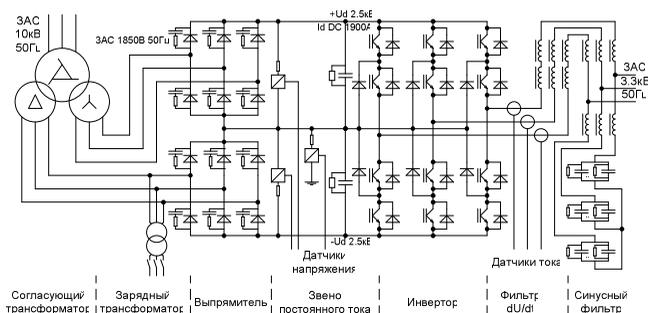


Рис. 2. Силовая схем преобразователя частоты

На рис. 1 показаны модельные напряжения и токи на входе системы (на первичной обмотке трансформатора). В качестве средства для устранения гармонических искажений, генерируемых системой, предлагается использовать активный фильтр гармоник (АФ), работающий в режиме «Кондиционер сети» [1]. Принцип активной фильтрации состоит в формировании сигнала, обратного гармоническим искажениям. При этом сигнал помехи из сетевых токов исключается. Существует несколько вариантов построения схемы с АФ. Как правило, для двухуровневых преобразователей частоты используются активные фильтры, построенные по автономного инвертора напряжения (АИН), нагруженного собственным накопительным конденсатором, рис. 3.1 [1]. Возможно выполнение силовой схемы АФ в виде трёхуровневого АИН с отсекающими диодами, рис. 3.2 [3].

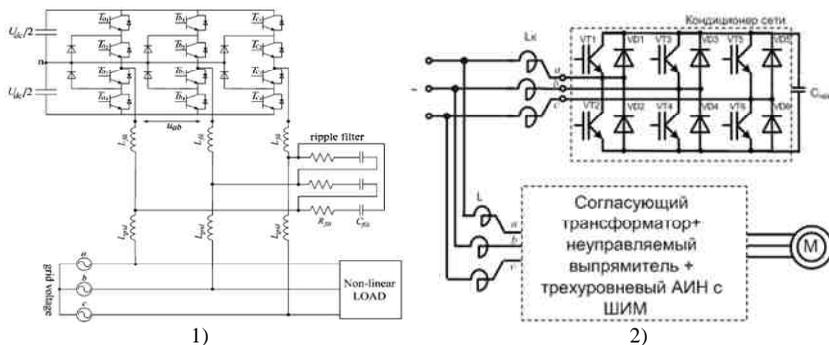


Рис. 3. 1 – силовая схема двухуровневого АФ с подключением к исследуемой системе; 2 – силовая схема трёхуровневого АФ. Non-linear load – исследуемая система

В основе алгоритмов управления силовыми ключами представленных активных фильтров лежит принцип формирования сигналов, обратных сигналам гармонических искажений. При помощи цифровых фильтров определяются первые гармоники сетевых токов, затем из них вычитаются «загрязнённые» помехами токовые сигналы. Полученная разность – сигнал задания. Однако существуют существенные различия. Система управления в первом случае строится по принципу ШИМ 2-го порядка, т.е. сигнал на включение транзисторов моста формируется релейными элементами в зависимости от знака упомянутой ранее разности, рис. 4.

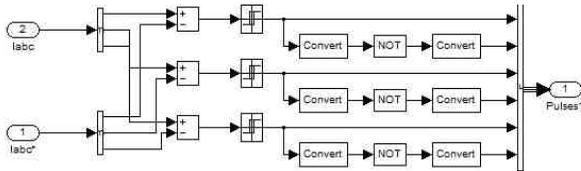


Рис. 4. Регулятор тока системы управления АФ

Система управления для 2-го варианта имеет более сложную структуру, основанную на векторном управлении в замкнутой по напряжению звена постоянного тока системе, рис. 5.

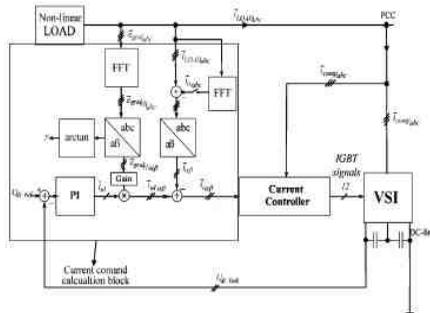


Рис. 5. Система управления трёхуровневым АФ

Результаты моделирования представлены на рис. 6

Основным показателем качества для сигналов сетевых напряжений и тока является коэффициент гармонических искажений (K_T) [2]. Его величина снижается с 30 % для сигналов сетевых токов до 1 – 3 % при подключении к системе активного фильтра гармоник. Сравнение работы двух вариантов схем АФ находится на стадии анализа. Применительно к схеме трёхуровневого ПЧ больше подходит АФ по схеме 2-го варианта.

Преимущество заключается в схожести структур систем векторного управления как для преобразователя частоты, так и для активного фильтра. При этом достигается большая стабильность работы системы, более высокие показатели Кг.

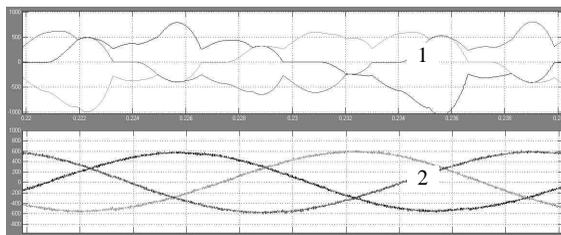


Рис. 6. Сетевые фазные токи: 1 – без подключения АФ и 2 – при подключении АФ

Библиографический список

1. **Целесообразность** применению активных выпрямителей в частотном приводе / К.К. Крутиков, В.В. Рожков // *Электричество*. – 2008. – № 8. – С. 34 – 40.
2. **Зиновьев, Г.С.** Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 200.
3. **Three-level** inverter-based shunt APF in three-phase three-wire and four-wire systems / O. Vodyakho, C.Mi. Chris // *IEEE Transactions On Power Electronics*. – Vol. 24. – No. 5. – May 2009.

*В.В. Корнеев, студ.; рук. А.Г. Приступ, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА или БПЛА) находят все большее применение в военных и гражданских областях. Современные тенденции связаны с разработкой полностью электрифицированного БЛА. Под полностью электрифицированным БЛА понимается летательный аппарат с единой централизованной системой электроснабжения, обеспечивающей все энергетические потребности «беспилотника», и отсутствием других энергетических систем, таких как гидравлические и пневматические, которые заменяются электроприводами на основе синхронных двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением. Это позволит снизить массу «беспилотника», повысить ремонтно-

пригодность. В системах электроснабжения таких БПЛА применяются синхронные генераторы с постоянными магнитами к которым предъявляются повышенные требования к массогабаритным показателям. Одной из основных трудностей при проектировании синхронных машин с магнитоэлектрическим возбуждением и однозубцовыми обмотками является определение главных размеров, к которым относятся диаметр рашотки статора (якоря) и расчетная длина воздушного зазора. Эти размеры определяют габариты, массу электрической машины и технико-экономические показатели. Проектирование стандартных электрических машин ведется с использованием справочной литературы и эмпирических выражений, которые основаны на опытных и статистических данных при конструировании подобных электрических машин. С помощью этих материалов можно определить оптимальные значения размеров для данного типа электрических машин. Однако проектирование нестандартных и специальных электрических машин осложняется отсутствием или недостаточностью таких данных. На кафедре электромеханики наработан большой опыт в проектировании синхронных машин с постоянными магнитами. Однако расчет данного класса электрических машин остается многовариантным. Расчет характеристик машин с постоянными магнитами сложен ввиду нелинейной зависимости изменений магнитных потоков в функции изменения тока и наличием в магнитопроводах участков с высокой степенью насыщения. Это не позволяет получить аналитических зависимостей для расчета характеристики, а графоаналитические методы требуют ряд допущений, что сказывается на точности расчета. В связи с высокими электромагнитными нагрузками исследуемого генератора требуется точное определение его параметров для проектирования. Поэтому используется моделирование магнитного поля в активном объеме генератора с применением метода конечных элементов. При разработке синхронных машин с постоянными магнитами, у которых повышенные требования к массогабаритным и энергетическим показателям, необходимо исследовать электрическую машину при различных режимах работы и различной нагрузке, с целью определения состояния машины, ее загруженность, возможности повышения нагрузки и определения теплового состояния. Это достигается математическим моделированием с помощью программы Matlab Simulink. Т.к. напряжение, вырабатываемое на генераторе, идет на выпрямитель, то для уменьшения величины пульсаций выпрямленного напряжения необходимо выполнять генератор с повышенной частотой генерируемого напряжения ($400 \div 1000$ Гц), возможно выполнение генератора с большим числом фаз ($6 \div 9$). Однако в нашем случае необходим трехфазный генератор, поэтому при проектировании постарались выбрать относительно высокую частоту напряжения. Основные рассчитываемые величины указаны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры генератора

Номинальная мощность	20 кВт
Выходное напряжение	200 В
Число фаз	3
Частота напряжения	641,667 Гц
Номинальная частота вращения	3500 об/мин
Число пар полюсов	11
КПД генератора	0,892
Масса генератора	17 кг

Генератор имеет жидкостное охлаждение. Применение эффективной системы охлаждения позволяет значительной степени повысить электромагнитные нагрузки и спроектировать генератор требуемой массы и габаритов.

Библиографический список

1. **Многополюсные** синхронные машины. Ч. 2. Электромагнитный расчет и программа расчета на ЭВМ: метод. указания / Ю.Г. Бухгольц [и др.]. – Новосибирск: НГТУ, 1996. – 49 с.
2. **Флора, В.Д.** Электрические машины специальных конструкций и принципов действия / В.Д. Флора. – Запорожье: Информационная система iElectro, 2011. – 254 с.

Е.А. Степанов, студ.;
рук. Г.И. Бояринов, к.т.н., профессор
(НИУ СФ «МЭИ», г. Смоленск)

АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДПТ СЕРИИ 2П В МЕТОДИКУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДПТ СЕРИИ 4П

Целью данной работы является общий анализ классической учебной методики проектирования И.П. Копылова двигателей постоянного тока серии 2П с целью её модернизации и последующего применения для проектирования двигателей серии 4П.

Исследование в перспективе позволит создать полноценную методику проектирования двигателей серии 4П. Такая методика будет иметь важное в первую очередь учебное значение. Сами двигатели проектируются и производятся уже не один десяток лет, но методика их расчета так и не нашла достойного отражения ни в учебной литературе (по экономическим причинам и из-за отсутствия преемственности в области создания методической литературы в этой области), ни в технической (по причинам, связанным с сохранением коммерческой и производственной тай-

ны). В отличие от текущей модернизации в других областях электромашиностроения, связанной в основном с совершенствованием активных и изоляционных материалов, при создании серии 4П в целях унификации была принципиально изменена конструкция статора.

В качестве объекта исследования выбраны две взаимосвязанные напрямую характеристики, которые тем не менее на данном этапе будут рассматриваться параллельно. С одной стороны, принципиальное изменение конструкции машины предполагает исследование поля, создаваемого обмоткой статора, в том числе компенсационной и добавочных полюсов. С другой стороны, разработка методики предполагает получение конкретной расчетной модели для проектирования, основанной на производственном опыте и в достаточной степени формализованной. Вместе с отрывочными данными, в том числе по принципиальным значениям индукции в зазоре и линейной нагрузки, может быть проведена, хоть и с погрешностями, оценка размеров магнитной системы и габаритных размеров двигателя.

Анализ картины поля состоит в сравнении таковой для двух двигателей: серии 2П и серии 4П с одинаковыми мощностными характеристиками. Существует смысл сравнивать именно одинаковые по мощности двигатели, так как удельный вес двигателей серий 4П и 2П на единицу мощности заметно отличается. В таком случае, оценка характеристик поля в зазоре и магнитопроводе будет невозможна, точнее, будет затруднено их сравнение. Конструктивные отличия позволяют для серии 4П увеличивать плотность тока в обмотках, что очевидно сказывается на размере машины. Также, распределенная компенсационная обмотка позволяет свести к нулю реакцию якоря. Само построение картины поля для двух машин не позволяет сделать конкретные выводы, которые найдут количественное отражение в методике проектирования двигателей серии 4П, но является хорошей иллюстрацией экономии материалов при производстве, а также показывает примерную идентичность распределения магнитного потока в машинах обеих серий.

Расчетная часть обновляемой методики начинается с анализа изменений в машинной постоянной при изменении конструкции. Это обусловлено тем, что применение стандартных пакетов статора, унифицированных с пакетами статоров асинхронных двигателей серии 4А, предполагает изменение установочных (и габаритных) размеров машины на начальном этапе расчета. В зависимости от диаметра якоря выбираются значения индукции в зазоре, линейной нагрузки и коэффициента полюсного перекрытия, которые существенно различаются для серий 2П и 4П. В соответствии с этими поправками, метод выбора основных характеристических параметров претерпевает изменения, позволяющие получить

при измененной конструкции заданную мощность при известных остальных значениях проектного задания.

В итоге, значения полученные в расчетной части, и сравниваются с полученными в результате моделирования, что позволяет сделать вывод об их объективности.

Данная работа представляет собой только начальный этап создания методики проектирования и во многом решает задачи качественного описания конкретных направлений исследования. Сочетание моделирования поля с корректировкой некоторых расчетных значений является отражением сочетания теоретического и инженерно-практического подхода к разработке. Сама же методика проектирования в перспективе позволит выполнять [учебное] проектирование на примерах неустаревших и повсеместно применяемых двигателей, имеющих принципиальные конструкционные отличия от предшествовавших серий.

Библиографический список

1. **Копылов, И.П.** Проектирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2011.
2. **Вольдек, А.И.** Электрические машины / А.И. Вольдек. – Спб.: Питер, 2008.

***В.В. Корнеев, студ.; рук. А.Г. Приступ, к.т.н., доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)***

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ПОМОЩИ ПАКЕТА SPEED

В настоящее время в мире разработаны различные программные продукты для проектирования и расчетов двигателей. Многие из них позволяют моделировать двигатели с нестандартными обмотками и постоянными магнитами в цепи магнитопровода. Расчет таких двигателей с использованием стандартных способ проектирования затруднителен и приводит к появлению погрешности. Основные затруднения связаны с расчетом нетрадиционных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу в виду не синусоидальности создаваемого ими потока, их гармоническому составу, а также наличием постоянных магнитов в магнитопроводе, что приводит к нелинейной зависимости основного магнитного потока и потока рассеяния от изменения тока. Одним из программных продуктов, позволяющих вести поверочный расчет электрических машин, является программный пакет SPEED, разработанный в университете

Глазго. Программный пакет SPEED состоит из модулей, с помощью которых можно рассчитывать различные виды электродвигателей: модуль PC-BDC – для расчета синхронных двигателей с постоянными магнитами; модуль PC-DCM – для расчета двигателей постоянного тока с постоянными магнитами; модуль PC-IMD – для расчета асинхронных двигателей; модуль PC-SRD – для расчета синхронных двигателей и другие. PC-BDC предназначена для моделирования и расчета двигателей приводов и генераторов с постоянными магнитами, самозапускающихся двигателей с постоянными магнитами, синхронных машин с электромагнитным возбуждением. Для оценки возможности расчета в учебных целях синхронного двигателя с постоянными магнитами программным пакетом SPEED был произведен поверочный расчет двигателя, спроектированного на кафедре ЭМ НГТУ. Задачей являлась оценка возможности применения указанного программного пакета для расчета электрических машин с однозубцовыми обмотками статора и возбуждением от постоянных магнитов. В результате проведенной оценки и исследования установлено, что программный пакет позволяет получать различные параметры, имеющие важное значение для выбора конструктивных материалов, геометрии и обмоточных данных машины. В качестве примера ряд полученных параметров представлены в табл. 1. Произведено сравнение полученных результатов с экспериментально полученными значениями. Данное сравнение представлено в табл. 2. По ним можно сказать, что использование программы SPEED в учебных целях возможно, т.к. программа считает с достаточной для учебного процесса инженерной точностью.

Таблица 1. Результаты расчета двигателя

Магнитный поток в воздушном зазоре, Φ	$0,653 \cdot 10^{-3}$ Вб
Индукция в воздушном зазоре, B_{δ}	0,951 Тл
Максимум индукции в зубцах статора, B_{z1}	1,954 Тл
Индукция в ярме статора, B_{a1}	1,383 Тл
Индукция в ярме (ободке) ротора, B_{a2}	1,031 Тл
Номинальный линейный ток, I_{n1}	5,06 А
Электрические потери, $P_{эл}$	8 Вт
Потери в стали, $P_{ст}$	201,149 Вт
Потребляемая мощность из сети, P_1	1309,342 Вт
Мощность на валу (номинальная мощность), P_2	1100,192 Вт
Коэффициент полезного действия, η	84,026 %
Крутящий момент, М	3,502 Н·м

Преимуществами пакета программ SPEED является удобный и понятный интерфейс, широкие возможности программы, такие как возможность рассмотрения различных конструкции роторов и пазов, различные методы расчетов поля двигателя в зависимости от конструкции машины и необходимой точности расчета, учета потерь, расчета основных харак-

теристик. Однако при расчете электрических машин с нетрадиционными обмотками и машин с высоким уровнем использования активных материалов следует более точно учитывать параметры магнитной цепи, ее насыщение, реакцию якоря, особенности обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, а также использовать более полные схемы замещения.

Таблица 2. Сравнение результатов

Показатель	Задано	Получено
Номинальная мощность, кВт	1,1	1,1
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,87	0,84
Номинальный ток, А	5,06	5,06
Потребляемая мощность из сети, кВт	1,309	1,26
Номинальное линейное напряжение, В	223	217
Номинальная частота вращения, об/мин	3000	3000

Несмотря на некоторые недостатки применение данного программного продукта для учебных целей является целесообразным, так как повышает эффективность проектирования и знакомит обучающихся с современными программными решениями в области расчетов электрических машин.

Библиографический список

1. **Руководство** к программе: SPEED's Electric Machines // TJE Miller. – 2011. – 613 с.
2. **Многополюсные** синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками. Часть 1. Основы теории и конструкция: метод. указание / Ю.Г. Бухгольц [и др.]. – Новосибирск: НГТУ, 1995. – 38 с.
3. **Многополюсные** синхронные машины. Ч. 2. Электромагнитный расчет и программа расчета на ЭВМ: метод. указание / Ю.Г. Бухгольц [и др.]. – Новосибирск: НГТУ, 1996. – 49 с.

А.В. Алейников, студ.;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор,
А.Н. Голубев, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЁТА ПОЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

В настоящее время все более широкое распространение получают приводы на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Соответственно возникает необходимость в более свершенных

системах их управления и более точных методах расчета. Современные модели СДПМ основаны на следующих допущениях:

1. не учитывается насыщение стали;
2. кривая размагничивания постоянного магнита линейна и не зависит от температуры;
3. не учитывается зубчатость сердечников, т.е. зазор машины предполагается гладким;
4. учитывается только радиальное синусоидальное распределение индукции в зазоре;

Предлагаемая модель СДПМ непосредственно в фазных координатах учитывает реальное распределение магнитного поля в активной зоне машины с учетом насыщения магнитной цепи, дискретного распределения многофазной обмотки статора по пазам и перемещения зубчатого сердечника статора относительно ротора с постоянными магнитами (ПМ).

Работа любой электрической машины описывается уравнениями движения вращающихся частей, уравнениями электрического состояния ветвей и электромагнитного момента.

Потокоцепления фаз обмотки статора $[\Psi]$ можно представить в виде суммы потокоцеплений от ПМ ротора и фазных токов статора:

$$[\Psi] = [\Psi_0] + [L][i], \quad (1)$$

где $[\Psi_0] = [\Psi_{10} \Psi_{20} \dots \Psi_{m0}]^T$ – матрица-столбец потокоцеплений фаз, обусловленных ПМ ротора; $[L]$ – матрица само- и взаимоиндуктивностей фаз обмотки статора.

Как показали проведенные исследования, насыщение магнитной цепи статора вентильных двигателей с ротором из высококоэрцитивных магнитов без ферромагнитных вставок обусловлено главным образом постоянными магнитами, а элементы матрицы $[L]$ можно считать линейными и независимыми от угла поворота ротора α . На рис. 1 приведены результаты расчета магнитного поля в активной зоне четырехполюсного СДПМ с номинальным электромагнитным моментом $M_3 = 170$ Нм в режимах холостого хода (а) и номинальной нагрузки (б) при повороте оси ротора относительно основной гармоники поля статора на $\pi/2$ электрических радиан. Анализ полученных результатов показывает, что насыщение магнитной цепи статора в режиме нагрузки практически не изменилось по сравнению с режимом холостого хода.

При этом допущении можно предварительно методами теории поля рассчитать кривые изменения потокоцеплений $[\Psi_0(\alpha)]$ от постоянных магнитов ротора в функции угла α с учетом реальной структуры актив-

ной зоны машины и насыщения стали. Элементы матрицы $[L]$ при известном угле α могут быть определены аналогичным образом. Для этого необходимо рассчитать поле в линеаризованной активной зоне ($\mu = \text{const}$) при возбуждении произвольным значением тока в одной из фаз при различных значениях α , при этом области, занятые постоянными магнитами, заменяются средами без источников поля, магнитные проницаемости которых равны магнитным проницаемостям ПМ.

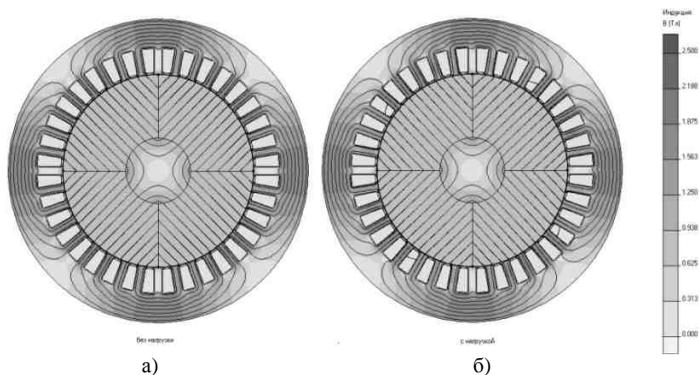


Рис. 1. Результаты расчета магнитного поля в активной зоне СДПМ

Электромагнитный момент СДПМ можно найти, применяя закон сохранения энергии к электромеханическому преобразованию в линейной модели нелинейной системы [1]. Его значение определяется по формуле

$$M_{\mathcal{E}} = [i]^T \frac{d[\Psi_0(\alpha)]}{d\alpha}.$$

При наличии в системе управления СДПМ обратных связей по фазным токам и углу положения ротора α предлагаемая модель позволяет формировать кривые фазных токов, обеспечивающих постоянный заданный электромагнитный момент при любом положении ротора относительно статора. Допустим, как один из вариантов, что при установившейся частоте вращения $\Omega = \text{const}$ фазные токи статора должны изменяться по синусоидальному закону с амплитудной модуляцией $I_m(t)$ таким образом, чтобы при заданном угле α относительно оси первой фазы статора величина электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}} = M_C$ оставалась неизменной в любой произвольный момент времени t . Тогда для любого момента времени t мгновенные фазные токи $[i]$ могут быть представлены выражением:

$$[i] = I_m(t)[S], \quad (3)$$

$$\text{где } [S] = \left[\sin(\omega t + \alpha) \dots \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi(k-1)}{m}\right) \dots \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi(m-1)}{m}\right) \right]^T.$$

Кривая $I_m(t)$ на периоде ее изменения определится по формуле

$$I_m(t) = \frac{M_{\Sigma}}{[S]^T \frac{d[\psi_0]}{d\alpha}}. \quad (4)$$

На рис. 2, 3 представлены кривые изменения мгновенных фазных токов при установившемся режиме соответственно трехфазного (рис. 2) и девятифазного (рис. 3) СДПМ, соответствующие постоянному номинальному моменту исследуемого двигателя, а также изменение модулированной амплитуды этих токов $I_m(t)$ по (4).

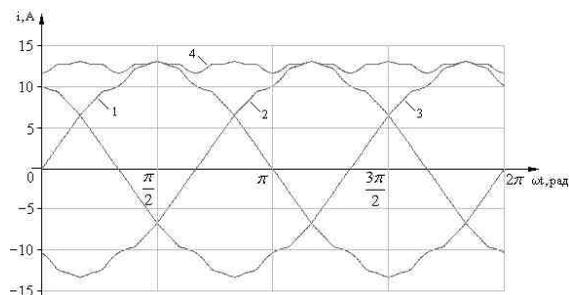


Рис. 2. Кривые изменения фазных токов трехфазного СДПМ при постоянном моменте: 1 – 3 – фазные токи; 4 – зависимость $I_m(t)$

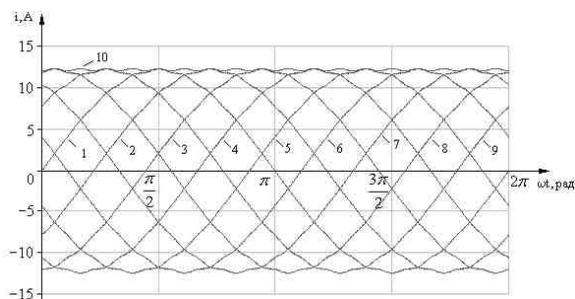


Рис. 3. Кривые изменения семи фазных токов фазных токов девятифазного СДПМ при постоянном моменте: 1 – 9 – фазные токи, 10 – зависимость $I_m(t)$

Из полученных результатов следует, что при использовании амплитудной модуляции токов для исключения пульсаций электромагнитного момента СДПМ токи всех фаз трехфазного, также как и токи всех фаз девятифазного СДПМ будут иметь одинаковую форму и гармонический состав. При этом амплитудная модуляция тока у девятифазного двигателя гораздо меньше, чем у трехфазного.

Предлагаемая модель позволяет построить, при наличии обратных связей по току, системы управления с улучшенными энергетическими и виброшумовыми характеристиками.

Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш. шк., 1989.

*Д.Ю. Морозова, студ.; рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАСЧЁТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ЗАКРИТИЧЕСКИХ» ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Целью работы является расчётное и экспериментальное исследование силы взаимодействия между постоянными магнитами в магнитожидкостном датчике угла наклона (МЖД). В качестве постоянных магнитов в МЖД применяются магниты, изготовленные из «закритических» материалов. Для проведения экспериментальных и расчётных исследований использовались магниты марки КС-37, II группы с величиной остаточной магнитной индукции $B_r = 0,77$ Тл и коэрцитивной силы $H_c = 540$ кА/м. Магниты имели форму дисков с размерами: 7×5 , 15×5 и 20×6 мм.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

Она состоит из полой цилиндрической трубки 1, изготовленной из немагнитопроводного материала, и двух постоянных магнитов 2, 3, направленных друг к другу одноименными полюсами. Внутренний диаметр трубок имел зазор с внешним диаметром постоянных магнитов в пределах ходовой посадки.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем: трубка располагалась перпендикулярно горизонтальной по-

верхности. На постоянный магнит 2, расположенный в верхней части трубки, действовала собственная сила тяжести этого магнита. Масса магнита определялась на электронных весах. Относительная погрешность измерений не более 0,1 %. Расстояние между магнитами l измерялось метрической линейкой из немагнитопроводного материала, для исключения возможных искажений магнитного поля. Погрешность измерений не превышала 10 %. Для изменения силы, действующей на магнит 2, его нагружали дополнительной массой: 20, 50, 70, 90, 100 и 120 грамм. При каждом значении массы фиксировалось расстояние l . Эксперименты проводились без магнитной жидкости (МЖ) и при её наличии. МЖ заправлялась в количестве 0,1 см³ между наружной поверхностью магнита 2 и внутренней цилиндрической поверхностью трубки 1.

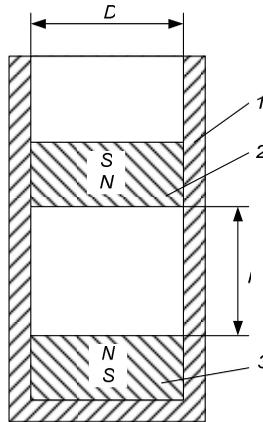


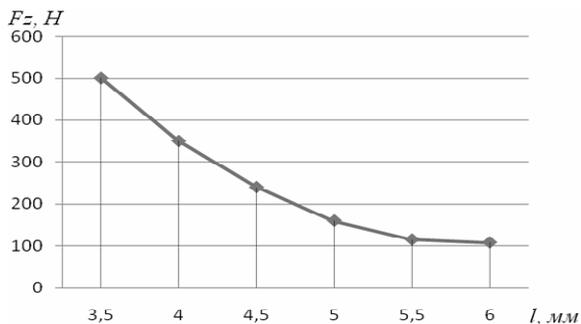
Рис. 1. Экспериментальная установка

Значение силы взаимодействия между магнитами определялось по алгоритму, представленному ниже [1]:

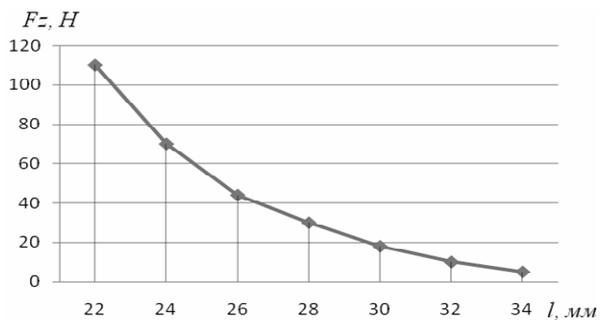
$$F_z = \frac{-\mu_0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot \pi \cdot R_2^2}{2} \cdot \left[\frac{z + h_1 + h_2}{\sqrt{R_1^2 + (z + h_1 + h_2)^2}} - \frac{z + h_1}{\sqrt{R_1^2 + (z + h_1)^2}} - \frac{z + h_2}{\sqrt{R_1^2 + (z + h_2)^2}} + \frac{z}{\sqrt{R_1^2 + z^2}} \right],$$

где M_1, M_2 – намагниченности магнитов; R_2 – радиусы магнитов, м; h_1, h_2 – высота магнитов, м; z – расстояние между магнитами, м.

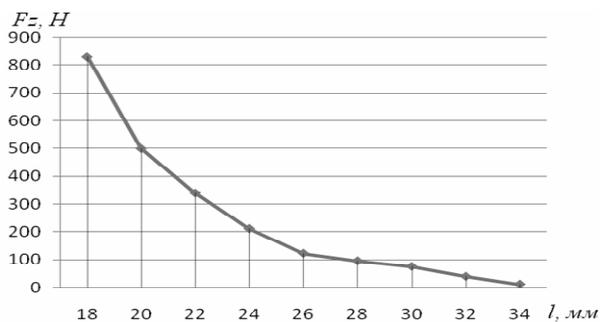
На рис. 2 (а, б, в) представлены зависимости силы взаимодействия между магнитами от расстояния между ними.



а) Параметры магнита: $D = 7$ мм, $h = 5$ мм, $m = 2$ г



б) Параметры магнита: $D = 15$ мм, $h = 5$ мм, $m = 16,5$ г



в) Параметры магнита: $D = 20$ мм, $h = 6$ мм, $m = 16$ г

Рис. 2 (а, б, в). Расчетно-экспериментальные зависимости силы взаимодействия между магнитами от расстояния между ними

Из полученных расчётно-экспериментальные зависимостей можно сделать вывод, что сила взаимодействия магнитов от расстояния между ними имеет нелинейный характер для всех рассмотренных случаев. Наличие МЖ и её отсутствие не оказывает влияния на величину силы взаимодействия между постоянными магнитами.

Библиографический список

1. Михалев, Ю.О. Исследование подвеса чувствительного элемента магнитожидкостного датчика угла наклона / Ю.О. Михалев, И.Е. Сабуров // Механика и физика фрикционного контакта: межвуз. сб. науч. тр. – Тверь, 2001. – С. 70 – 75.

*М.Р. Русанов, курсант; рук. А.В. Топоров, Е.А. Топорова
(ИвИ ГПС МЧС России, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА РАДИАЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО УПЛОТНЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

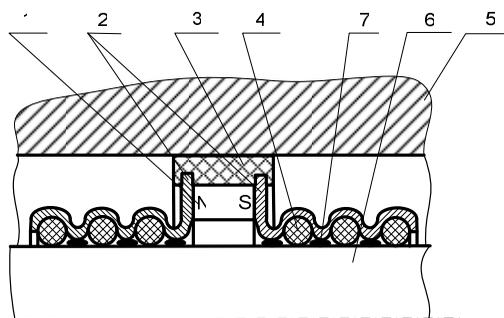
Одной из основных проблем, возникающих при использовании магнитожидкостных уплотнений является обеспечение необходимой величины рабочего зазора. Традиционные магнитожидкостные уплотнения накладывают жесткие требования на точность и качество изготовления. Зачастую применение магнитожидкостных уплотнений требует установки дополнительных опорных подшипников. Такие технические решения приводят к значительному удорожанию конструкции [1].

Таким образом актуальной задачей является разработка уплотнительного устройства не чувствительного к радиальным биениям вала. Существует конструкция торцовового магнитожидкостного уплотнения, в котором решена проблема обеспечения величины рабочего зазора [2]. Однако, такое уплотнение не может применяться для герметизации радиальных зазоров.

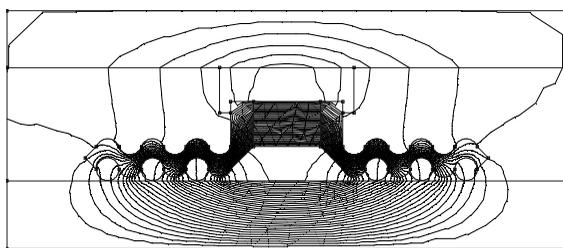
На рис. 1 представлена схема предлагаемого радиального комбинированного магнитожидкостного уплотнения.

Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита 1, магнитопроводов волнообразной формы 2, примыкающих к постоянному магниту 1. Кольцевой постоянный магнит 1 и магнитопроводы волнообразной формы 2 закрепляются во втулке из эластомерного материала 3. Во впадины магнитопроводов волнообразной формы 2 устанавливаются кольца

из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4. Втулка из эластомерного материала 3 устанавливается в корпус уплотняемого устройства 5. В качестве подвижного магнитопровода 6 используется вал уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 7 помещается в зазор между выступами магнитопроводов волновой формы 2 и валом 6.



а)



б)

Рис. 1. Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение: а – схема уплотнения; б – картина магнитного поля

Магнитная жидкость удерживается магнитными силами между выступами магнитопроводов волнообразной формы 2 и валом 6 проходящим через магнитопроводы волнообразной формы. Кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4 примыкают к валу 6. Магнитные силы возникают в результате протекания магнитного потока по контуру: кольцевой постоянный магнит 1 → магнитопровод волнообразной формы 2 → вал 6 → магнитопровод волнообразной формы 2 → кольцевой постоянный магнит 1. При возникновении перепада давлений магнитные силы, действующие на магнитную жидкость 7 компенсируют его действие, тем самым, обеспечивая герметичность уплотнения.

Кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4 препятствуют изменению зазора между валом 6 и выступами магнитопроводов волнообразной формы 2 возникающим в результате несоосности вала, вибраций и по другим причинам. При этом перемещения магнитопроводов 2 компенсируются за счет упругих свойств втулки из эластомерного материала 3.

Результаты магнитного расчета уплотнения представлены на рис. 1б. Как видно из картины магнитного поля линии магнитного потока в рабочем зазоре концентрируются на волнообразных выступах магнитопроводов волнообразной формы, обращенных к валу. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре составляет 0.22 Тл. Таким образом на основании приведенных данных можно утверждать, что уплотнение будет обеспечивать удержание определенного перепада давлений.

Библиографический список

1. **Магнитные** жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов [и др.]; под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
2. **Патент** на полезную модель RU 88407 U1 от 10.11.2009. Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение / Топоров А.В., Топорова Е.А., Пучков П.В.

*А.Е. Антоненко, А.Н. Беляев, студенты;
рук. Л.И. Шеманаева, к.т.н., доцент
(КГТА, г. Ковров)*

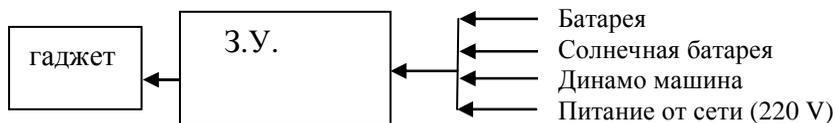
ПОРТАТИВНОЕ ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО

В настоящее время абсолютное большинство людей имеют различные гаджеты которые, как известно, нуждаются в подзарядке. Причём не всегда есть возможность зарядить их в нужное время. Поэтому мы разработали портативное зарядное устройство, обеспечивающее своевременную зарядку вашего гаджета в нужное для вас время.

Устройство включает в себя схему преобразования энергии источника питания и источник питания.

Источниками питания в нашем устройстве являются:

1. батарея;
2. солнечная батарея;
3. динамо машина;
4. питание от сети (220 v).



Структурная схема

В дальнейшем мы собираемся оснастить наше устройство маячком для его быстрого нахождения.

Библиографический список

1. Векслер, Г.С. Электропитание радиоустройств / Г.С. Векслер. – 1966.
2. Лаврус, В. Батареи и аккумуляторы / В. Лаврус. – 2005.

*А.А. Благин, студ.; Л.И. Шеманаева, к.т.н., доцент
(КГТА, г. Ковров)*

УПРАВЛЯЕМЫЙ ДИОДНЫЙ СВЕТИЛЬНИК НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ ATMEGA8

Несмотря на то, что в настоящее время наиболее популярным источником света являются люминесцентные и галогенные лампы в офисах, коридорах и конференц-залах, а ДРЛ и ДНАТ на улицах и в промышленных помещениях. На их место уже пришли более энергоэффективные светодиодные светильники. Они применяются для освещения складов, промышленных территорий и объектов, парков, спортивных сооружений и площадок, улиц, офисов, ангаров и т.д. Применение светодиодных светильников позволяет снизить расходы на электроэнергию и обслуживание, они не загрязняют окружающую среду, долговечные и компактные.

Наш светильник обладает еще дополнительными свойствами, такими как: возможность управления режимами свечения, возможность создать собственный режим свечения.

Питание всей системы осуществляется от батарейки 5 В, которой достаточно для поддержания работы контроллера и светодиодов.

Структурная схема устройства (рис. 1).

Как видно из рисунка, микроконтроллер программируется через USB порт, далее компьютер не требуется, плата с микроконтроллером имеет собственный источник питания – батарейку, программное обеспечение может легко изменяться как сими потребителем, так и изготовите-

лем, на данный момент нами разработано пять различных режимов, управляемых кнопкой на печатной плате.



Рис. 1. Структурная схема устройства

Светодиоды соединены группами по пять штук, причем не последовательно, а разбросаны по линии, что дает возможность разнообразить режимы свечения.

Использование микроконтроллера дает возможность увеличить количество светодиодов на каждый пин микросхемы до семи штук, (сейчас их по пять на каждом пине), а так же увеличить количество групп.

Нами предусмотрены следующие режимы:

1. эффект постепенного разгорания и затухания;
2. различные степени задержки последовательного включения;
3. различное чередование включающихся светодиодов.

Светильник прошел стендовые испытания, нам понравилось.

Библиографический список

1. ГОСТ ИСО 8995-2002.
2. **Датчики:** справ. / под ред. З.Ю. Готры, О.И. Чайковского. – Львов: Каменяр, 1995.
3. **Виглеб.** Датчики. Устройство и применение. – М.: Мир, 1989.
4. **Котюк, А.Ф.** Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк. – М.: Радио и связь, 2006.
5. **Иванов-Цыганов, А.И.** Источники вторичного электропитания приборов СВЧ / А.И. Иванов-Цыганов, В.И. Хандогин. – М.: Радио и связь, 1989.
6. **Четти, П.** Проектирование ключевых источников электропитания / П. Четти. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. **Рысин, О.В.** Схемотехническое решение передачи цифрового кода узкополосным аналоговым сигналом / О.В. Рысин, А.В. Рысин.
8. **Семенов Б.Ю.** Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Р, 2001.
9. **Куо, Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986.

А.Р. Киямутдинова, студ.;
рук. А.Н. Борисов, к.т.н., доцент
(КГЭУ, г. Казань)

ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

Любой из нас может заметить, что свет, излучаемый, казалось бы, одинаковыми лампами дневного света может быть разным. Какие-то из них искажают красный или синий, свет других кажется резким или, наоборот, мягким. Светодиодные лампы испускают свет, цветовая температура которых, как впрочем и цветовая температура других источников освещения имеет существенное влияние на наше восприятие окружающего пространства. С физической точки зрения – это важнейший качественный параметр, определяющий степень естественности (белизны) света, испускаемого лампой.

Возможности светодиодов позволяют создавать аналоги традиционных ламп с более востребованными характеристиками. Особенно в ювелирной отрасли, где для подсветки ювелирных изделий в зависимости от используемого драгоценного металла и драгоценных камней необходимо использовать свою цветовую температуру.

Правильный подбор цветовой температуры для освещения оказывает важное влияние на ощущение комфорта. В офисе цветовая температура системы освещения – это создание комфортной атмосферы для работы и, как следствие, повышение производительности труда и снижение уровня внутриорганизационных конфликтов. В местах общественного питания (кафе, ресторанах) цветовая температура системы освещения – это создание благоприятной, уютной атмосферы для питания и общения. В жилищах и гостиницах цветовая температура системы освещения – это создание ощущения спокойствия и уюта, повышая качество отдыха. В торговых площадях цветовая температура системы освещения – это расстановка световых акцентов, благоприятствующих быстрому нахождению нужного товара, совершению покупки и, как следствие, увеличению продаж товаров.

Цветовая температура имеет большое значение не только для выбора лампы при покупке. Данный параметр, к примеру, довольно часто используется в фототехнике, чтобы правильно определить, какой должна быть фотовспышка, как оптимально настроить чувствительность фотоаппарата или жидкокристаллического экрана.

*М.С. Егоров, студ.; рук. А.В. Кондратьев, к.т.н., доцент
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ» РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

В настоящее время понятия «интеллектуальное энергоснабжение» и «энергосбережение» неразрывно связаны друг с другом. Ресурсосбережение и энергоэффективность являются одними из ключевых понятий в концепции SMART GRID.

Говоря об «умных сетях», чаще всего имеют ввиду распределительные сети. Однако, данное понятие во многом применимо непосредственно к потребителям: предприятиям, учреждениям, жилому сектору. В этом случае, более применимо понятие «MICRO SMART GRID» или «Умный дом» («Smart House»).

Переход к «умным сетям» подразумевает под собой целый комплекс мероприятий: замена оборудования на энергоэффективное, автоматизированное управление, дистанционный контроль работы, технического состояния и потребления, установка устройств, повышающих качество поступающей энергии, а также установка «умных счётчиков».

В качестве примера приведу кафедру «Электроснабжение промышленных предприятий» в НИУ «МЭИ». Основной потребитель электроэнергии на кафедре (и во многих других организациях и учреждениях) является система освещения: в основном люминесцентные лампы, в меньшей степени лампы накаливания и светодиодные светильники.

Есть несколько возможностей снижения потребления энергии источниками света:

- 1) замена на энергосберегающие светильники (с люминесцентными лампами типа T5 или со светодиодами);
- 2) установка электронных ПРА вместо электромагнитных;
- 3) оснащение системой регулирования.

Замена светильников – это относительно дорогостоящее и трудозатратное мероприятие. При использовании регулирования светового потока срок окупаемости составляет 5,5 лет при экономии 13 тыс. кВт·ч/год (что в денежном эквиваленте при тарифе 4,5 руб/кВт·ч составляет 60 тыс. руб/год) и средних затратах 330 тыс. руб.

Существуют некоторые ограничения на использование того или иного источника света.

Люминесцентные лампы, в том числе их пускорегулирующие устройства, чувствительны к изменениям напряжения. При частых коммутациях сокращается их срок службы. Это приводит к тому, что новые све-

тильники не окупаются свой срок окупаемости и не окупают средств, вложенных в них.

С другой стороны, установка светодиодных источников света не рекомендуется в местах, где люди заняты работой, требующей сильного зрительного напряжения. Связано это в первую очередь с тем, что современные светодиодные лампы имеют характеристики цветопередачи хуже, чем их газоразрядные аналоги, а также сильно влияют на утомляемость.

Поэтому светильники с люминесцентными лампами следует ставить в помещениях, где люди находятся продолжительное время: в аудиториях, кабинетах. А светильники со светодиодами – в местах, где требуются частые коммутации: коридоры, подсобные помещения.

Однако затраты на модернизацию можно снизить, если в уже существующие светильники устанавливать вместо электромагнитного пускорегулирующего устройства – электронное с возможностью регулирования.

Следует при этом помнить, что существует два типа ЭПРА: с холодным и тёплым пуском. ЭПРА первого обеспечивает быстрое включение светильника. Однако наиболее безопасен с точки зрения срока службы запуск лампы с предварительным прогревом электродов («тёплый пуск»). Поэтому, при использовании регулирования следует устанавливать ЭПРА второго типа.

Во втором случае срок окупаемости составит 4,5 года при экономии 12,2 тыс. кВт·ч/год (55 тыс. руб/год) и затратах в 250 тыс. руб. Сравнение двух вариантов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение вариантов мероприятий по энергосбережению на кафедре

Мероприятие	Полная замена светильника	Замена части светильников и установка ЭПРА
Затраты	330,0	250,0
Экономия		
1. Электроэнергии, тыс. кВт·ч	13,0	12,0
2. Финансовых средств, тыс. руб/год	60,0	55,0
Срок окупаемости	5,5	4,5

Одним из элементов технологии MICRO SMART GRID является автоматизация потребления. Если говорить об освещении, то речь идёт в первую очередь о датчиках, регулирующих световой поток.

Существует несколько видов, применяемых для этого.

1. PIR-датчики (Passive InfraRed). К ним относятся датчики присутствия и датчики движения, отличающиеся лишь точностью идентификации. Датчики присутствия способны отлавливать даже малейшие движения человека вплоть до ударов по клавишам клавиатуры. В свою очередь, датчики движения способны обнаруживать лишь явные движения, такие как ходьба.

2. Датчики освещённости, которые реагируют на изменение поступающего естественного света и освещённости в помещении. Чаще всего, датчики освещённости совмещаются с датчиками присутствия.

В свою очередь, инфракрасные PIR-датчики делятся по типу установки на настенные и потолочные.

При выборе того или иного датчика следует руководствоваться тем, для каких целей и в каких помещениях мы намерены их установить.

Для коридоров и подсобных помещений, где люди находятся эпизодически и их движения ощутимы, достаточно установить датчик движения, который включит светильник в тот момент, когда человек проходит мимо, и выключит его в течение установленного времени.

Для кабинетов и аудиторий разумнее ставить датчики присутствия и датчики освещённости. В случае их совмещения, дополнительный эффект энергосбережения будет получен при установке роллетных систем. Роллетные системы, кроме экономии электроэнергии на цели освещения, позволяет снизить:

а) затраты на кондиционирование летом за счёт снижения солнечной активности;

б) затраты на отопление благодаря дополнительной воздушной подушке между окном и роллерами.

Подводя итоги, можно дать следующие рекомендации:

1. В аудиториях, офисах классах устанавливать светильники с люминесцентными лампами и ЭПРА с тёплым пуском. Регулирование светового потока в этом случае осуществлять посредством датчиков присутствия. При совмещении их с датчиками освещённости, устанавливать роллетные системы.

2. В коридорах и подсобных помещениях использовать светодиодные источники света, управляемые датчиками движения.

Библиографический список

1. **Федеральный** закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. **Краснопольский, А.Е.** Пускорегулирующие аппараты для газоразрядных ламп / А.Е. Краснопольский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.

3. **Егоров, М.С.** Повышение энергоэффективности в системе освещения / М.С. Егоров // Фёдоровские чтения – 2011: XLI Всеросс. науч.-практ. конф. – 2011. – С. 75 – 77.

4. **Егоров, М.С.** Применимость технологий SMART GRID к энергосбережению у потребителей / М.С. Егоров // Фёдоровские чтения – 2012: XLII Всеросс. науч.-практ. конф. – 2011. – С. 77 – 78.

5. **Рекомендации** по проектированию автоматического управления освещением в зданиях с помощью датчиков присутствия, датчиков движения и датчиков освещённости в проектах систем освещения для экономии электроэнергии. – М., 2012.

*М.С. Казанов, студ.; рук. А.В. Кондратьев, к.т.н., доцент
(ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ», г. Москва)*

ВНЕДРЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Развитие распределённого производства электроэнергии является одной из значимых тенденций последнего десятилетия. Экономическое и социальное развитие создаёт условия для увеличения спроса на энергоресурсы, проявляются проблемы централизованной энергетики. В их числе, в ходе проведения «круглого стола» на тему: «Перспективы развития малой распределённой и возобновляемой энергетики в Российской Федерации» 24 сентября 2012 г., были названы недостаточное качество электрообеспечения потребителей, высокая частота аварийных отключений, высокие тарифы на энергоресурсы, высокая степень износа генерирующего оборудования и др. [1].

В числе преимуществ малой распределённой энергетики, помимо устранения недостатков централизованной, обычно выделяют повышение энергоэффективности за счёт комбинированного производства тепловой и электрической энергии, возможность использования местных видов топлива и побочных продуктов производства, возможность масштабирования генерации за счёт модульной структуры при росте потребностей в энергии. Немалую роль играют и экологические преимущества, особенно при использовании возобновляемых источников энергии [2, 3].

Имеются и недостатки, усложняющие и, в некоторых условиях, ставящие под сомнение рациональность внедрения источников распределённой генерации. Среди них: несовершенство законодательной базы, проблемы оценки экономической эффективности капитальных затрат и окупаемости проектов, вопросы организации эксплуатации и обслуживания на объектах внедрения, а также ряд технических вопросов.

Ситуация со значительным объёмом и структурой потребления электроэнергии, возникшая на объекте исследования, предприятии по производству подшипников качения, поставила вопрос о внедрении собственных дополнительных источников питания. При этом особый интерес уделяется когенерационным установкам: на производстве отсутствует центральное теплоснабжение, отопление помещения осуществляется с применением электрических водогрейных котлов, оказывающих серьёзное влияние на суммарную нагрузку и потребление предприятием электрической энергии в отопительный период.

После проведения оценки имеющихся на рынке технологий для применения в конкретных условиях, был сделан выбор в пользу газопоршневых и микротубинных генерирующих установок. На сегодняшний день их внедрение для обеспечения энергоснабжения производственных и общественных зданий получило широкое распространение.

Выбор типоразмера установки и разработка проекта интеграции являются обычными инженерными задачами. Однако существующие методы зачастую не рассматривают решение типичных технических проблем: усложнение систем противоаварийного управления и диспетчеризации, систем релейной защиты и автоматики; проблемы совместного применения децентрализованного и централизованного электроснабжения; изменение параметров нормального и аварийного режимов.

В ходе исследования был проведён расчёт токов короткого замыкания (КЗ) в системе электроснабжения объекта исследования с установленной мощностью 8 МВА и среднегодовой заявленной – 0,75 МВА. Целью расчёта явилась оценка токов подпитки в аварийном режиме при различных вариантах подключения генерирующих установок. К рассмотрению приняты варианты подключения дополнительных источников питания к шинам 6 и 0,4 кВ; расчёт производился в точках замыкания на шинах распределительной и трансформаторной подстанции, а также на выводах электроприёмников потребителя. В исследовании первоначально взяты типичные, «усреднённые» параметры установок в качестве рассмотрения показательных случаев.

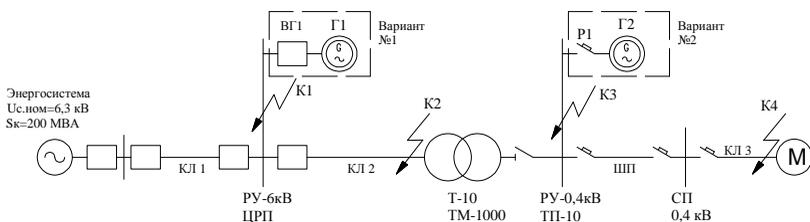


Рис. 1. Расчётная схема исследования

В результате проведения расчётов установлено, что подпитка точки КЗ от генерирующей установки, работающей параллельно в сеть, может достигать значительных величин, особенно при подключении источника питания в непосредственной близости от места КЗ. Это может повлечь за собой неэффективность работы защитного оборудования, повреждение электрооборудования, угрозу безопасности производства и персонала. В табл. 1 приведены расчётные значения при мощностях установок: Г1 – 1 МВА; Г2 – 100 кВА.

Таблица 1. Расчетные параметры аварийных режимов

		Отдельная работа ЭЭС*	Г1 (Автоном. работа)	Г1 (Парал. ра- бота с сетью)	Г2 (Автоном. работа)	Г2 (Парал. ра- бота с сетью)
К1	$I_{п0.1}, \text{кА}$	17,448	0,792	18,240	1,659	19,107
	$i_{уд.1}, \text{кА}$	32,036	2,238	34,275	6,623	38,660
К2	$I_{п0.2}, \text{кА}$	16,716	0,790	17,506	1,678	18,394
	$i_{уд.2}, \text{кА}$	27,004	2,234	29,238	6,712	33,716
К3	$I_{п0.3}, \text{кА}$	23,864	3,439	27,302	1,274	25,138
	$i_{уд.3}, \text{кА}$	52,621	4,868	57,488	5,070	57,690
К4	$I_{п0.4}, \text{кА}$	3,243	1,875	6,082	1,197	4,441
	$i_{уд.4}, \text{кА}$	4,587	2,652	7,239	3,312	7,899

* – исходный режим.

При рассмотрении конкретных проектных решений, подразумевающих внедрение в существующие системы значительных дополнительных генерируемых мощностей, влияние источников распределённой генерации в электрохозяйствах потребителей может быть значительней приведённого примера. Это обосновывается возможностью масштабирования и параллельной работы нескольких установок в блоке.

Значение суммарного тока подпитки зависит от количества параллельно работающих генераторов и от их единичной мощности. При его увеличении могут потребоваться дополнительные вложения в модернизацию электрохозяйства. В определённых условиях может нарушиться общеизвестная тенденция увеличения удельных затрат за единицу вырабатываемой мощности с уменьшением размера установки. Расчёт параметров аварийных режимов помогает определить наиболее сбалансированный вариант соотношения мощности и количества установок с точки зрения минимальных затрат на реконструкцию и усиление системы электроснабжения.

В настоящее время продолжают исследования с целью выявления закономерности изменения и наиболее удачного соотношения между единичной мощностью генерирующих установок, их количеством и суммарными капитальными вложениями на внедрение дополнительных источников питания с учётом модернизации системы внутреннего электроснабжения. Вместе с этим проводится оценка наиболее эффективного варианта соотношения потребления мощности от централизованной системы и источников малой распределённой энергетики.

Библиографический список

1. **Перспективы** развития малой распределенной и возобновляемой энергетики в Российской Федерации: рекомендации «круглого стола», 24 сентября 2012. – 11 с.
2. **Centralized** and distributed generated power systems – a comparison approach / J.A. Mohon, S. Meliopoulos, R. Saint // PSERC Publication 12-08, Howard University, June 2012. – 33 p.

3. **Distributed** generation: a definition / T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder // Electric Power System Research. – 2001. – № 57. – Pp. 195 – 204.

4. **ГОСТ Р 52735-2007**. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока свыше 1 кВ: Введ. 12.07.2007. – М., 2007. – 41 с.

5. **ГОСТ 28249-93**. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока до 1 кВ: Введ. 01.01.95. – М., 2003. – 53 с.

*Н.В. Чижикова; рук. А.В. Манин, к.т.н., доцент
(РГАТУ им. П. А. Соловьева, Рыбинск)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА УСТАНОВОК ПО ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Современный технологический прогресс требует разработки новых материалов, обладающих определенными физическими свойствами. К таковым, к примеру, можно отнести тугоплавкие монокристаллы лейкосапфира, получаемые искусственным способом. Эти кристаллы обеспечивают развитие энергосберегающих технологий; источники света на сверхъярких светодиодах экономичнее люминесцентных ламп в два раза, срок их службы – 50 тысяч часов и больше, а энергопотребление в разы меньше.

Монокристаллы лейкосапфира получают искусственным способом с применением специализированных ростовых установок. Методы выращивания различны. Выращивание монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса является относительно новой технологией в соответствующей промышленной отрасли. Технология выращивания представляет собой довольно сложный, связанный с прецизионной передачей электрической энергии из сети в рабочий орган. Он требует непрерывного и гарантированного энергообеспечения, поскольку сопровождается обеспечением строго определенных температурных условий (2040° – это еще расплав, а 2036° – уже кристалл). Необеспечение требований точности регулирования электрической энергии приводит к значительному увеличению брака при производстве монокристаллов, а также колоссальным потерям электроэнергии, затрачиваемой во время технологического цикла.

В ходе наблюдений было установлено, что технологический процесс выращивания монокристаллов сопровождается нарушением симметрии в сети, в результате чего происходит «просадка» напряжения, т.е. многократные кратковременные понижения питающего напряжения, напряже-

ния. Это обстоятельство приводит, как минимум, к изменению направления кристаллизации монокристалла и образованию дефектных включений, пузырьков, примесей, и как максимум, к его замерзанию. В результате, возникает брак продукции, экономический ущерб от которого составляет примерно 0,5 млн рублей. Убыток производства будут составлять дополнительные потери электроэнергии, затрачиваемые на производство нового монокристалла; затраты на оплату труда сотрудников, задействованных в повторном технологическом процессе; упущенная прибыль, т.е. доходы, которые могли бы быть получены за определенный промежуток времени при обеспечении симметричного режима; в крайних случаях требуется закупка нового тигля стоимостью 40 тысяч долларов.

В целях повышения эффективности технологии выращивания кристаллов, а также снижения производственного брака требуется применение симметрирующих устройств, обеспечивающих прецизионную передачу электрической энергии из сети в рабочий орган установки.

При всей своей надобности, подобных устройств на рынке силовых элементов предоставлено недостаточно. Существующие способы стабилизации сети не позволяют в полной мере устранить проблему симметрирования, поскольку при наличии резкопеременных нагрузок дискретный характер их регулирования не обеспечивает точности параметров симметрирования сети.

В целях снижения производственного брака и повышения эффективности технологии выращивания кристаллов, мною предлагается разработка и применение симметрирующей установки (СУ) на базе магнитовентильных элементов, представляющей собой элемент с плавнорегулируемым изменением характера проводимости – емкостного или индуктивного – от 0 до номинального значения (рис. 1). Изменение параметров сопротивлений изменяется посредством фазоуправляемого тиристорного ключа при естественной коммутации по сигналу управления для обеспечения нормального коэффициента несимметрии. Регулирующая характеристика СУ представлена на рис. 2.

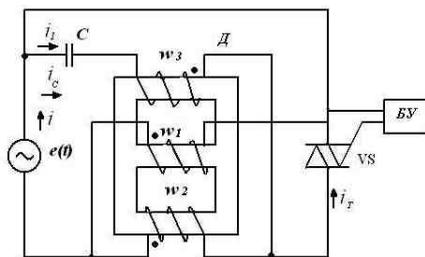


Рис. 1. Принципиальная схема межфазной СУ

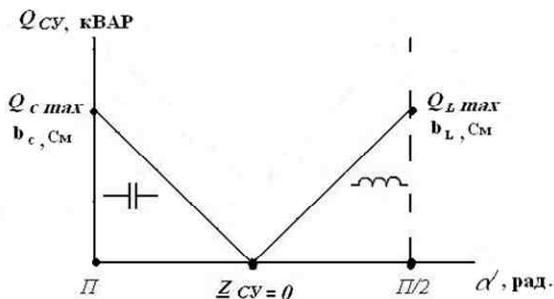


Рис. 2. Регулировочная характеристика СУ – Q (α)

Схема включения СУ в трехфазную сеть представлена на рис. 3.

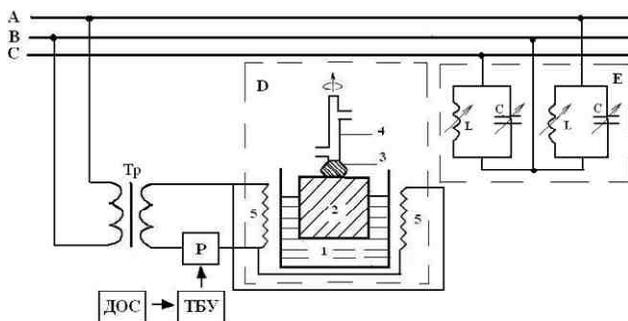


Рис. 3. Схема включения СУ в трехфазную сеть

А.В. Фролов, студ.;
рук. Е.А. Щучкина, Г.М. Свиешкина, преподаватели
(ГБОУ РМ СПО (ССУЗ) «СЭМК», г. Саранск)

ИСПЫТАНИЕ ЛАМП ДРЛ250М В РЕЖИМЕ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ ГОРЕНИЯ

Целью работы является исследование режима горения лампы ДРЛ250М с повышенной удельной дозировкой ртути в электрической схеме включения ламп с дросселем повышенной мощности, с целью возможности разработки энергосберегающей технологии испытания ламп

ДРЛ250М на продолжительность горения (срок службы) в режиме циклических включений.

Задачами исследования являются:

- исследовать режим горения ДРЛ250М с повышенной удельной дозировкой ртути, превышающей в 1,2 раза номинальное значение в режиме повышенной мощности (ДРЛ 400);
- обобщить полученные данные с целью создания энергосберегающей технологии испытаний ламп на продолжительность горения.

Объектом исследования является дуговая ртутная люминесцентная лампа ДРЛ250М.

Предмет исследования – проведение опытов с дуговой ртутной люминесцентной лампой ДРЛ250М.

Практическая значимость работы – снижение затрат на проведение испытаний ламп на продолжительность горения за счёт сокращения сроков испытаний ламп (с ~2-х лет до ~2-х месяцев).

Актуальность тематики – ускорение испытания ламп ДРЛ250М с целью экономии электроэнергии и времени испытаний.

Достойное место среди источников искусственного света, применяемого в установках наружного и промышленного освещения, занимают газоразрядные лампы высокого давления типа ДРЛ. Лампы типа ДРЛ (дуговые, ртутные, люминофорные), благодаря высокой световой отдаче (45 – 60 лм/Вт), большому сроку службы (15 – 20 тыс. ч), удовлетворительной цветопередаче ($R_a \approx 42\%$), приспособленности для работы в стандартных электрических сетях напряжением 220 В и возможности производства ламп на мощности от 50 Вт до 2 КВт, получили широкое применение для промышленного и наружного освещения [1, стр. 503].

Качество ламп определяется как конструкцией ламп, так и состоянием технологического оборудования, соблюдением технологической дисциплины на всех стадиях производства. Изготовленные лампы, подвергаются ряду проверок и испытаний, подтверждающих их соответствие различным требованиям, в том числе и испытания на продолжительность горения. На получение результатов испытаний уходит от 1 до 3 лет, что в условиях массового производства в значительной степени снижается оперативность оценки качества ламп, и принятия необходимых корректирующих действий по устранению возможных несоответствий. Кроме того, такие испытания требуют значительных материальных затрат как на содержание соответствующих испытательных станций, так и на проведение самих испытаний, в процессе которых расходуется особенно много электроэнергии, то есть, технология испытаний достаточно энергоёмкая. Для решения указанной проблемы были проведены исследования режима горения ламп ДРЛ250М, имеющих повышенную удельную дозировку

ртути (в 1,2 раза больше её номинального значения) в режиме повышенной мощности горения.

Проведение испытаний ламп в режиме повышенной мощности обусловлено тем, что лампе придается повышенная удельная нагрузка на кварцевое стекло, повышенная температура на рабочих электродах, которые покрыты оксидным покрытием. Тем самым, придается режим ускоренного «старения» лампы. То есть ускоренный спад светового потока, вследствие более интенсивного распыления материала электрода и эмиттера, а также более интенсивного уменьшения светоотражения кварцевого стекла. Срок испытаний сокращается примерно с 2 лет до 2 месяцев.

Исследование режимов испытания проводилось в светотехнической лаборатории ГУП Республики Мордовия «Лисма».

С помощью секундомера фиксировалось время разгорания лампы по номинальному значению напряжения горения (U_n , В), равным 130 В, а также рост напряжения горения до момента самовыключения (погасания).

Сущность выполненной работы заключается в сочетании методов ускоренных испытаний в режиме частых включений и повышенной мощности. Режим частых включений достигался за счёт введения в горелку повышенной удельной дозировки ртути. В этом случае напряжение горения на лампе постоянно возрастает, и когда сетевого напряжения становится недостаточно для поддержания стабильного режима горения лампы ДРЛ, она гаснет. Такой способ испытаний позволяет упростить их, и отказаться от применения различного рода схемных решений, необходимых для создания циклического режима. Режим повышенной мощности достигается за счёт включения лампы ДРЛ250М с пускорегулирующим аппаратом повышенной мощности (например, 400 Вт).

Изменение электрических характеристик лампы ДРЛ250М с повышенной удельной дозировкой ртути в процессе разгорания представлено на рис. 1.

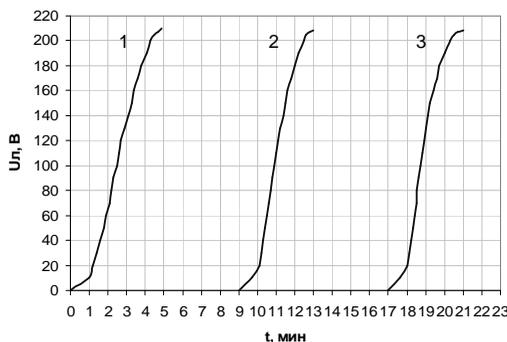


Рис. 1. Изменение электрических характеристик лампы ДРЛ250М с повышенной удельной дозировкой ртути

Следует отметить, что цикличность работы лампы обеспечивается без каких-либо коммутирующих устройств, реле времени, переключателей и тому подобное.

Практическое выполнение результатов исследований выглядит следующим образом.

В производственных условиях ГУП РМ «Лисма» были изготовлены две партии ламп ДРЛ250М (по 8 шт. в каждой партии):

- партия № 1 – это лампы с повышенной удельной дозировкой ртути. Испытывались на срок службы с дросселем 400 Вт в режиме частых включений напряжением сети 220 В;

- партия № 2 – это лампы с номинальными электрическими и световыми параметрами, соответствующие техническим условиям (ГОСТу). Испытывались на срок службы согласно нормативно-технической документации ГУП РМ «Лисма» на напряжение сети 220 В.

Для партии № 1 перед началом испытаний экспериментально для каждой лампы была определена длительность цикла выключения, состоящая из суммарного времени горения лампы от момента зажигания до погасания и времени её остывания до повторного включения. По длительности цикла определено примерное время необходимое для проведения ускоренных испытаний.

Кроме того, у каждой лампы, включённой в сеть 220 В с дросселем 400 Вт, был измерен световой поток, причем измерение светового потока проводилось в момент достижения на лампе номинальных значений её параметров – мощности лампы (250 Вт) и напряжения горения (130 В). Длительность одного цикла составила ~8 минут. За один час количество циклов составит 7,5. За одни сутки (24 ч) количество циклов соответственно составит 180.

Экспериментально установлено, что один час горения лампы ДРЛ250М с повышенной удельной дозировкой ртути в режиме циклических включений, эквивалентно 10 часам горения лампы ДРЛ250М обычной конструкции, и испытываемой по стандарту и нормативно-технической документации.

Практические результаты проведенной работы могут быть положены в основу создания энергосберегающей методики по проведению ускоренных испытаний газоразрядных ламп высокого давления типа ДРЛ для периодических испытаний ламп на срок службы (продолжительность горения) в условиях массового производства ламп с неизменной конструкцией и стабильным технологическим процессом. Одновременно с текущими лампами изготавливается определенное количество ламп с повышенной дозировкой ртути специально для поведения испытаний.

В результате исследований был проведен экономический расчет целесообразности проведения ускоренных испытаний. Экономия электроэнергии при испытании ламп ДРЛ250М в циклическом режиме равна 23486,8 кВт/ч. Экономия времени на проведение испытаний – 22 месяца. Длительность испытаний в циклическом режиме – 1200 часов (~2 месяца). Длительность испытаний в обычном режиме – 12000 часов (~2 года).

Библиографический список

1. **Рохлин, Г.Н.** Разрядные источники света / Г.Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 720.

*А.А. Мамонов, студ.;
рук. Г.М. Свиёшкина, Е.А. Щучкина, преподаватели
(СЭМК, г. Саранск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМП ДНаТ250 С ДВУМЯ ГОРЕЛКАМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Целью настоящей работы является исследование режимов горения и зажигания ламп ДНаТ250 с двумя горелками и определение эффективности их применения в осветительных установках наружного освещения.

Задачами исследования являются:

- исследовать режимы горения и зажигания ламп ДНаТ250 обычной и оптимизированной конструкции;
- рассчитать экономический эффект от применения ламп ДНаТ250 с двумя горелками для уличного освещения;
- сделать выводы о целесообразности внедрения ламп ДНаТ250 с двумя горелками.

Объектом исследования являются газоразрядные лампы высокого давления типа ДНаТ250 с двумя горелками.

Предмет исследования – эффективность применения ламп ДНаТ250 с двумя горелками для уличного освещения.

Практическая значимость работы:

- снижение затрат на уличное освещение;
- повышение качества уличного освещения.

Актуальность тематики: улучшение эксплуатационных характеристик ламп ДНаТ250.

Для создания комфортной световой среды для труда и отдыха человеку необходимо достаточное количество света, не искажающего краски окружающего мира. И желательно достигать этого с минимальными затратами энергии.

В светотехнике, как и в любой отрасли науки и техники, существует ряд параметров, характеризующих свойства источников света. [1, с. 8]. Эти параметры можно разделить на три группы: электрические, световые и эксплуатационные. Электрические параметры характеризуют лампу как потребителя электрической энергии и определяют возможность ее подключения к источникам питания. К электрическим параметрам относят номинальное напряжение питающей сети и номинальную мощность лампы. Для разрядных ламп различают еще напряжение зажигания, рабочее напряжение на лампе, пусковой и рабочий токи лампы.

Световые параметры более разнообразны. Нормирование тех или иных определяет назначение лампы. У ламп, предназначенных для общего освещения, основными световыми параметрами являются световой поток, цветопередача и пульсации излучения.

Эксплуатационные параметры определяют возможность и технико-экономическую целесообразность применения ламп данного типа в той или иной осветительной установке. К эксплуатационным параметрам ламп относятся световая отдача, средний срок службы, зависимость световых и электрических параметров от напряжения питания и условий внешней среды, размеры и форма лампы и ряд других [1, с. 10].

Натриевые лампы высокого давления или дуговые трубчатые натриевые лампы – ДНаТ имеют максимальную световую отдачу среди ГЛВД. Очень большой срок службы и почти не изменяющееся значение светового потока при длительных сроках службы делают эти лампы самыми экономичными ГЛВД [1, с. 610].

Отличительной особенностью конструкция ламп ДНаТ с двумя горелками является то, что во внешнем баллоне лампы содержатся две разрядные трубки (горелки), соединенные электрически параллельно между собой. При включении лампы зажигается одна из горелок. Преимущество лампы ДНаТ с двумя горелками заключается в том, что процессе срока службы горелки работают поочередно. Электрические и световые параметры ламп с двумя горелками аналогичны параметрам ламп ДНаТ с одной горелкой.

Лампы ДНаТ с двумя горелками предназначены для эксплуатации в существующей светотехнической арматуре для натриевых ламп с одной горелкой, при этом значительно снижаются эксплуатационные затраты.

Предлагаемая лампа ДНаТ с двумя горелками по сравнению с лампами ДНаТ с одной горелкой, обладает следующими преимуществами:

1. конструкция лампы обеспечивает повышенную стабильность светового потока лампы в процессе их срока службы, вследствие поочередного горения горелок;

2. конструкция лампы обеспечивает повышенный срок службы лампы в осветительной установке до 10 лет горения и выше;

3. конструкция лампы обеспечивает более быстрое повторное включение лампы при кратковременном отключении напряжения питания;

4. применение лампы ДНаТ с двумя горелками в наружном освещении позволяет снизить эксплуатационные затраты на обслуживание осветительных установок, вследствие увеличения срока службы лампы.

Исследование режимов горения и зажигания лампы ДНаТ250 проводилось в светотехнической лаборатории ГУП Республики Мордовия «Лисма». При исследовании режимов зажигания и горения лампы ДНаТ250 с двумя горелками установлено следующее:

1. Зажигается и горит в лампе только одна из горелок, условно горелка № 1.

2. При отключении электроэнергии и снова повторном (практически мгновенно) включении сразу же (без паузы) зажигается и другая горелка условно горелка № 2.

3. Практически отсутствует пауза (перерыв в освещении) в зажигании и горении лампы. Отсутствует дискомфорт в освещении, который может привести к непредсказуемым последствиям в жизни общества для человека.

4. Длительность горения лампы с другой горелкой (условно горелка № 2) до режима номинальной мощности составила 465 с.

Исследования режимов зажигания и горения лампы ДНаТ250 показали целесообразность проведения работ по оптимизации конструкции лампы с точки зрения увеличения их срока службы, улучшения их эксплуатационных характеристик (исключения дискомфорта в освещении), а также уменьшения эксплуатационных затрат при их эксплуатации.

Учитывая изложенное выше, логично полагать, что введение в конструкцию лампы ДНаТ250 двух горелок, электрически параллельно соединенных между собой, позволяет увеличить в два раза срок службы лампы с 24000 до 48000 часов горения. Такая конструкция лампы исключает паузы в зажигании и горении при внезапном и кратковременном отключении электроэнергии, то есть, исключается дискомфорт в освещении.

Для определения целесообразности использования лампы ДНаТ250 оптимизированной конструкции был проведен анализ существующей ситуации по использованию лампы различных модификаций для уличного освещения в г. Саранске. Освещением улиц в Саранске занимается Му-

ниципальное предприятие городского округа Саранск «Горсвет». Уличное освещение Саранска включает в себя 15336 светильников, из них 5369 ламп ДНаТ обычной конструкции. Исследуемые лампы ДНаТ250 с двумя горелками в настоящее время в наружном освещении г. Саранска не используются.

Время включения и отключения наружного освещения производится в зависимости от продолжительности светового дня, в соответствии с утвержденным графиком. Общее время горения одной лампы составляет 3895,18 часов в год.

За один год подлежит замене в среднем 1002 лампы ДНаТ250 (по данным МП «Горсвет» за два года). Учитывая, что для лампы ДНаТ250 с двумя горелками срок службы в два раза больше, чем для обычной лампы, можно предположить, что количество ламп, подлежащих замене, сократится в два раза и составит 501 шт. в год. Фактические затраты на замену одной лампы различной модификации без учета стоимости ламп составляют 413,71 рублей.

Для определения эффективности применения ламп ДНаТ250 оптимизированной конструкции вместо обычных ламп ДНаТ250 был произведен сравнительный расчет затрат на замену ламп данных модификаций. В результате расчета было установлено, что затраты на замену одной лампы ДНаТ250 с одной горелкой составляют 575,29 рублей и для лампы ДНаТ250 с двумя горелками – 681,71 рублей. Годовой экономический эффект от применения ламп ДНаТ250 с двумя горелками составляет 234903,87 рублей.

В представленной работе исследован режим горения и зажигания ламп типа ДНаТ250, и на их основе найдены пути оптимизации конструкции ламп с точки зрения увеличения их срока службы, улучшения качества. Теоретически обоснованы положения, касающиеся попеременной работы 2 горелок, установленных в одной колбе лампы, и электрически параллельно соединенных между собой (вместо одной горелки в колбе лампы обычной конструкции).

Установлено, что применение в лампе ДНаТ250 2 горелок, электрически параллельно соединенных между собой, позволяет исключить паузы (перерыв в зажигании и горении) при кратковременном отключении и быстром повторном включении лампы в электрическую сеть. Технически обоснована возможность увеличения срока службы ламп ДНаТ250 с 2 горелками в два раза с 24 тыс. часов горения до 48 тыс. часов горения.

Применение в наружном освещении ламп ДНаТ250 с 2-мя горелками позволяет снизить эксплуатационные затраты по обслуживанию ламп, и тем самым получить экономический эффект в размере 234903,87 рублей в год (на примере г. Саранска).

Библиографический список

1. Рохлин, Г.Н. Разрядные источники света / Г.Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 720.

*В.В. Волков, студ., И.Ю. Долгих, асп.;
рук. А.Н. Королёв, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сталь, как один из основных конструкционных материалов, используется в различных модификациях в изделиях большинства отраслей промышленности. При этом технология обработки стали и получение готовой продукции вариативна и зависит как от качественных показателей самой стали, так и требуемых характеристик самих изделий. Очевидно, что изучение особенностей технологии обработки стали на основе более глубокого знания её характеристик, является актуальной задачей при совершенствовании производства и повышении качества готовой продукции.

Индукционный нагрев стальных изделий является одним из наиболее распространённых технологий [1], осуществляющий повышение температуры заданного объёма металла до требуемого уровня с помощью воздействия на него электромагнитного поля. При этом частота тока индуктора, создающего это поле, во многом определяет глубину нагрева и характер взаимовлияния изделия и источника поля. Поэтому изучение частотных характеристик ферромагнитных материалов, к которым относится сталь, является необходимым условием совершенствования технологии и оборудования установок индукционного нагрева.

Структурная схема экспериментальной установки по исследованию частотных характеристик стального проводника представлена на рис. 1.

В исследуемой электрической цепи используется стальной проводник R_C диаметром $d = 1,5$ мм и длиной $l = 5$ м, соединённый последовательно с резистором R . Многофункциональный источник питания МИП обеспечивает подачу в исследуемую электрическую цепь постоянного и переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц.

Питание электрической цепи постоянным током позволили определить сопротивление резистора R и стального проводника R_C , а также его

удельное сопротивление $\rho = 3,1503 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. При подаче в электрическую цепь переменного тока сопротивление стальной проволоки определялось по формуле (1), которое позволяет рассчитать глубину проникновения тока Δ (2).

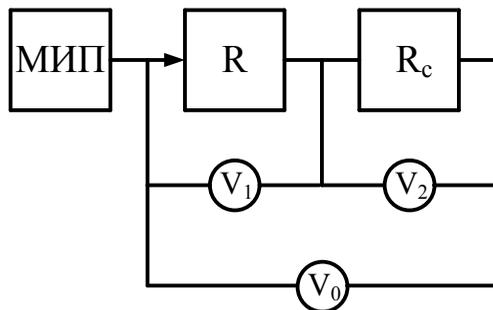


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: МИП – многофункциональный источник питания; R – резистор; R_c – стальной проводник; V_0 , V_1 , V_2 – вольтметры

$$R_c = \frac{U_2 R \cos \left(180 - \arccos \frac{U_1^2 + U_2^2 - U_0^2}{2U_1 U_2} \right)}{U_1}, \quad (1)$$

$$\Delta = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_{\pi}}{\pi}}, \quad (2)$$

где r – радиус стального проводника; $S_{\pi} = \rho \frac{1}{R_c}$ – площадь поперечного сечения проводника, пропускающая переменный ток.

Индуктивность проводника L_c рассчитывалась по формуле (3):

$$L_c = \frac{\sqrt{\frac{U_1^2 U_2^2}{R^2} - R_c^2}}{2\pi f}, \quad (3)$$

где f – частота переменного тока.

Графики изменения глубины проникновения тока, индуктивного сопротивления и индуктивности проводника в функции частоты представлены на рис. 2, 3, 4 соответственно.

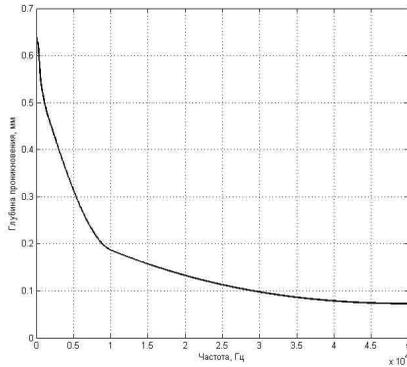


Рис. 2. График изменения глубины проникновения тока в сечение проводника в функции частоты

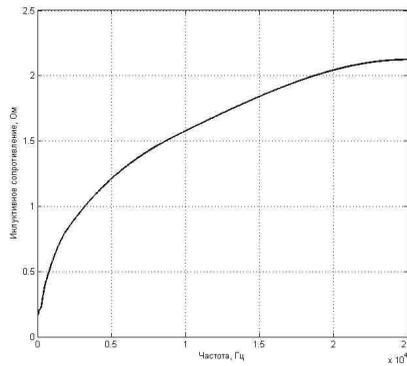


Рис. 3. График изменения индуктивного сопротивления проводника в функции частоты

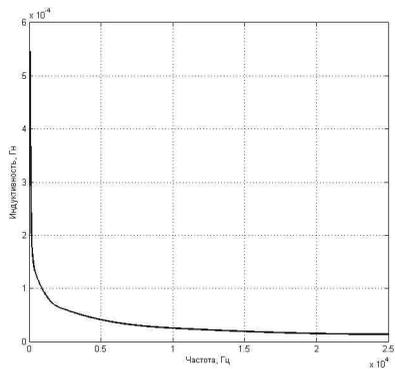


Рис. 4. График изменения индуктивности проводника в функции частоты

Анализ кривых подтверждает известную зависимость глубины проникновения тока в проводнике и индуктивного сопротивления от частоты. Однако для последнего необходимо учитывать влияние индуктивности ферромагнитного проводника, снижающейся при увеличении частоты.

Библиографический список

1. **Установки** индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.

*В.В. Волков, студ., И.Ю. Долгих, асп.;
рук. А.Н. Королёв, к.т.н., доцент,
А.С. Орлов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ

Индукционный нагрев, как один из прогрессивных технологических методов обработки металлов, широко используется в различных отраслях промышленности. Публикации по индукционному нагреву в основном направлены на теорию [1, 2] или практическую реализацию [3]. Однако аналитические методы исследования не позволяют учесть всё многообразие характеристик используемых материалов и видов изделий из них. Наибольший интерес в этом плане представляют характеристики, учитывающие комплекс воздействий на материал, к которому, прежде всего, относятся частота электромагнитного поля и температура металла. Поэтому для оптимизации технологии индукционного нагрева и конструкции используемого оборудования актуально иметь характеристики, отображающие влияние этих факторов.

В связи с многообразием сортов стали целесообразно иметь экспериментальное подтверждение основных технологических положений. Поэтому в докладе рассматриваются полученные в результате экспериментального исследования частотно-температурные зависимости для стального проводника.

Схема экспериментальной установки (рис. 1) для исследования частотно-температурных зависимостей включает в себя многофункциональный источник питания (МИП), обеспечивающий подачу в исследуемую

электрическую цепь постоянного и переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц, и исследуемый стальной проводник R_c , соединённый последовательно с резистором R с известным сопротивлением. Исследуемый проводник помещён в камеру электропечи и постепенно нагревается от комнатной температуры до 1000 °С.

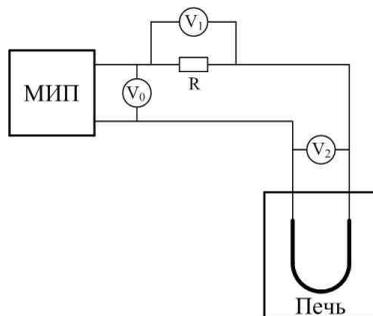


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На основе измеренных вольтметрами V_0 , V_1 и V_2 полного напряжения, напряжения на резисторе и напряжения на исследуемом проводнике выполнен расчёт активного и индуктивного сопротивления, глубины проникновения тока и индуктивности по нижеприведённой методике.

При пропускании в электрической цепи постоянного тока определяется удельное сопротивление исследуемого проводника при заданной температуре:

$$\rho = \frac{R_c S}{l},$$

где R_c – сопротивление проводника, определяемое по закону Ома, S – площадь поперечного сечения проводника, m^2 , l – длина проводника, м.

На основе измеренного напряжения U_1 при известном сопротивлении R определяем величину переменного тока:

$$I = \frac{U_1}{R}.$$

В соответствии с векторной диаграммой (рис. 2) определяются активное и индуктивное сопротивление исследуемого проводника:

$$\alpha = \arccos \frac{U_1^2 + U_2^2 - U^2}{2U_1 U_2},$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha,$$

$$U_{Rc} = U_2 \cos \beta,$$

$$U_{Xc} = U_2 \sin \beta,$$

$$R_c = \frac{U_{Rc}}{I_{\approx}}, X_c = \frac{U_{Xc}}{I_{\approx}}.$$

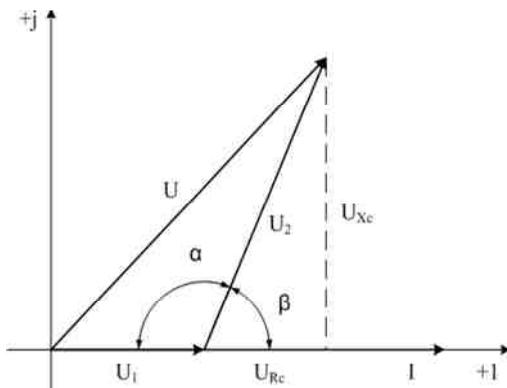


Рис. 2. Векторная диаграмма

Определяем площадь поперечного сечения проводника, пропускающую переменный ток:

$$S_{\approx} = \rho \frac{1}{R_c}.$$

Тогда глубина проникновения тока определится из выражения:

$$\Delta = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_{\approx}}{\pi}},$$

где r – радиус проводника.

Определяем индуктивность проводника:

$$L = \frac{X_c}{2\pi f}.$$

График изменения удельного сопротивления материала проводника от температуры показан на рис. 3.

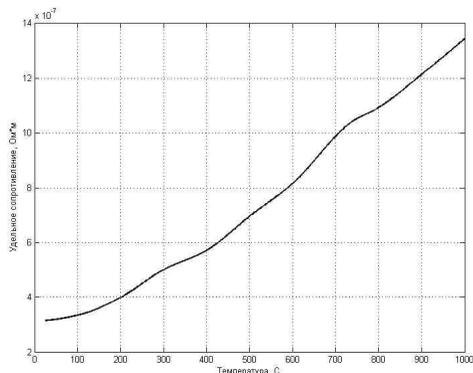


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от температуры

На рис. 4 и 5 представлены зависимости индуктивного сопротивления стального проводника и глубины проникновения от температуры при различных значениях частоты тока. Анализ кривых показывает на увеличение индуктивного сопротивления при нагревании, что компенсирует рост удельного сопротивления проводника и приводит к практически постоянному значению глубины проникновения тока до точки структурных изменений стали. При превышении температурой этой точки индуктивное сопротивление проводника резко падает из-за потери сталью магнитных свойств, и глубина проникновения тока начинает резко возрастать. При этом в связи с использованием в опыте эффективных значений напряжений и тока глубину проникновения в этом случае можно квалифицировать как эквивалентную.

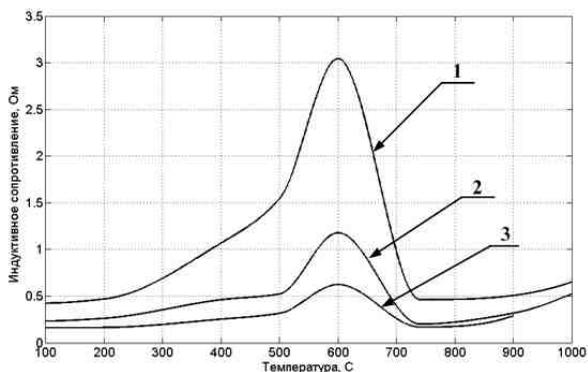


Рис. 4. Зависимость индуктивного сопротивления от температуры: 1 – частота 2 кГц; 2 – частота 500 Гц; 3 – частота 100 Гц

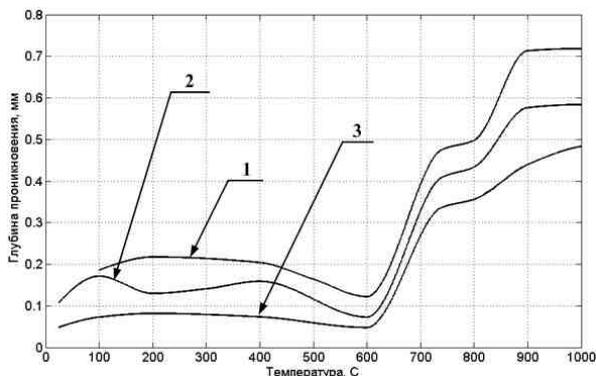


Рис. 5. Зависимость глубины проникновения от температуры: 1 – частота 10 кГц; 2 – частота 25 кГц; 3 – частота 50 кГц

Библиографический список

1. **Установки** индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
2. **Расчёт** мощностей и электромагнитных сил в установках индукционного нагрева: учеб. пособие / Ф.Н. Сарапулов. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – 89 с.
3. **Индукторы** / под ред. А.Н. Шамова – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 69 с.

*К.Е. Корнилов, студ.; рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИИ «БЕСКУДНИКОВО»

Феррорезонансные явления возникают в электрических цепях содержащих нелинейную индуктивность и емкость. На подстанциях при оперативных переключениях могут образоваться различные последовательные или последовательно-параллельные схемы соединения индуктивности трансформатора напряжения с емкостью шин и конденсаторов, шунтирующих контактные разрывы выключателей. При определенном сочетании параметров индуктивных и емкостных элементов в цепи может возникнуть феррорезонанс, это вызывает скачки напряжения и тока в обмотке трансформатора напряжения, что может привести к повреждению трансформатора напряжения и оборудования и подстанций.

В РД 34.20.517 [МУ 34-70-163-87] собраны мероприятия, алгоритм анализа и методы борьбы с феррорезонансом, однако эффективного и универсального инструмента для идентификации этого явления.

В данной работе был предложена модель и разработан алгоритм позволяющий оценить возможность возникновения феррорезонанса на подстанциях 220 кВ и выше. Работоспособность и достоверность этого алгоритма исследовалась на схемах подстанции «Бескудниково» в Московской области, где в конце 2011 года произошла авария, в следствии феррорезонанса поврежден трансформатор напряжения. Для расчетов использовалась данные, предоставленные с подстанции.

Расчеты выполнялись с использованием пакета SIMULINK. В ходе исследования были приняты следующие допущения:

1. распределенные активные сопротивления, индуктивности, емкости электрооборудования считаются линейными элементами и рассматриваются как сосредоточенные параметры;
2. не учитываются активные сопротивления и индуктивности ошиновки электрических подстанций;
3. не учитываются потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводах трансформаторов.

Алгоритм состоит из расчета начальных условий и расчета самого феррорезонансного процесса.

На рис. 1 представлена схема замещения феррорезонансной цепи, где трансформатор представленный активным сопротивлением и нелинейной индуктивностью (R_T и L_T), емкость конденсатора шунтирующего контакты выключателя (C_V) и емкость оборудования на землю (C_Z).

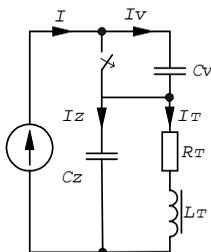


Рис. 1. схема замещения феррорезонансной цепи

Свойства нелинейной индуктивности задаются основной кривой намагничивания, которая аппроксимируется выражением:

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

где A, B, C – коэффициенты аппроксимации.

Система уравнений состояний и элементов, составленные для схемы расчета начальных условий приводятся к нормальной форме Коши:

$$\frac{dI_T}{dt} = \frac{E - I_T \cdot R}{\frac{A \cdot B}{1 + (B \cdot I_T)^2} + C}.$$

Аналогичные преобразования проводятся для составления расчетных выражений для анализа феррорезонансного режима

$$\frac{dU_{C_V}}{dt} = \frac{\omega \cdot C_Z \cdot U \cdot \cos(\omega t + \varphi) + I_T}{C_Z + C_V};$$

$$\frac{dI_T}{dt} = \frac{U \cdot \sin(\omega t + \varphi) - U_{C_V} - I_T \cdot R_T}{L_T}.$$

На рис. 2 приведена модель для расчета в SIMULINK.

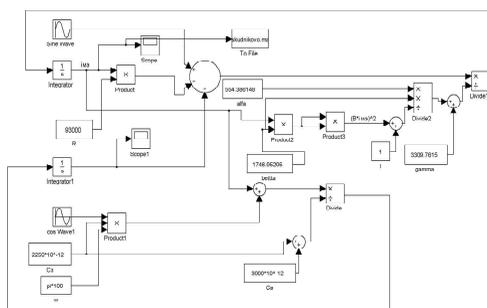


Рис. 2. Модель для расчета возможного феррорезонанса

Анализ схем может проводиться с помощью расчетов либо, если отсутствуют уточненные данные расчетов, допускается экспериментальная проверка возможности существования феррорезонанса.

Для предотвращения феррорезонанса используют три способа:

- 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.

В плане конкретных действий по предотвращению и подавлению феррорезонанса можно привести:

- выбор схем электрических соединений распределительных устройств 150 – 500 кВ, в которых возникновение феррорезонанса с электромагнитными трансформаторами напряжения исключено;
- снятие емкостных делителей напряжения с воздушных выключателей 110 кВ, для остальных – по согласованию с заводом-изготовителем;
- увеличение емкости системы шин;
- изменение порядка ведения оперативных переключений;
- применение емкостных трансформаторов напряжения НДЕ;
- применение устройств, фиксирующих возникновение феррорезонанса и осуществляющих его подавление и вывод трансформатора напряжения из феррорезонанса.

Существуют «антиферрорезонансные» электромагнитные трансформаторы напряжения, которые не должны являться причиной феррорезонансных явлений, а в случае возникновения их демпфировать. Производители трансформаторов напряжения часто после внесения изменений в конструкцию ТН, которые могут снизить вероятность феррорезонанса, называют их «антиферрорезонансными», но полностью не предотвращают это явление. На «Бескудниково» пострадали такие трансформаторы напряжения, производства фирмы «Trench», заявленные как «антиферрорезонансные» (рис. 3).

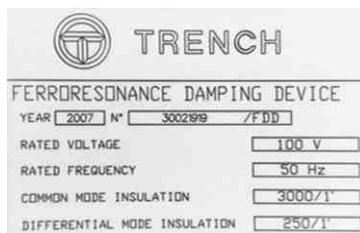


Рис. 3.

Согласно ГОСТ 1983-2001 п. 3.1. антиферрорезонансным является «трансформатор, устойчиво работающий при наличии в сети феррорезонансных явлений». Целесообразно указать в нормативных документах, что антиферрорезонансный трансформатор:

- 1) не должен вызывать феррорезонанс и смещение нейтрали за пределы установленные нормами;
- 2) должен во всех длительно возможных режимах сохранять свои метрологические характеристики в установленных пределах.

Заключение

1. Феррорезонанс – опасное явление, которое может приводить к серьезным авариям. Поэтому нужно использовать все возможные методы по его предотвращению и подавлению, как на стадии проектирования так и в процессе эксплуатации.

2. Понятие «антиферрорезонансный трансформатор» напряжения и требования к нему (ГОСТ 1983-2001) должны быть уточнены, необходимо внести соответствующие изменения в нормативные документы.

3. ГОСТ 1983-2001 должен содержать специальную методику оценки устойчивости функционирования «антиферрорезонансных» трансформаторов напряжения, которая предполагает математическое моделирование и натурные испытания.

Библиографический список

1. 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.
2. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.

*О.В. Демиденко, А.А. Заякина, студенты;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г.Иваново)*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА ГАЗОВЫХ СРЕД

Одним из условий надёжной герметизации технологического оборудования различного назначения содержащего газовой среды является отсутствие утечек по поверхности вращающихся валов. В традиционных типах уплотнений, предназначенных для герметизации вращающихся валов, присутствуют натекания газовой смеси, проникновение внешней среды во внутренний объём, что приводит к нарушению технологических циклов, браку продукции, аварии технических систем.

Требование полной герметичности вращающихся валов может быть выполнено только за счёт использования магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ). Они обладают существенными преимуществами перед традиционными типами уплотнений, а именно: абсолютной герметичностью $10^{-6} - 10^{-7}$ мм рт. ст., низким собственным моментом трения, высоким ресурсом работы (до 50000 часов), простотой технического обслуживания.

Целью работы является исследование МЖГ для герметизации вала вентилятора газодинамического контура диаметром 170 мм.

Исходными данными для проведения расчета является величина рабочего зазора МЖГ, которая изменялась в пределах от 0,15 до 0,3 мм, величина шага зубца, которая составляла 3 мм, площадки при основании зубца 0,2 мм. Зубец выполнен в форме прямоугольной трапеции с углом при основании 45° . Расчёт проведен для двух магнитопроводных сталей марок: Сталь 10 и Сталь 20Х13. В качестве источника магнитного поля выбран постоянный магнит марки КС-37 с величиной остаточной индукции 0,77 Тл и коэрцитивной силой 540 кА/м. В рабочий зазор МЖГ была направлена магнитная жидкость (МЖ) с намагненностью насыщения 40 кА/м.

При проведении численных исследований использовался метод конечных элементов, реализованный в среде ELCUT, в которой был выполнен расчёт магнитного поля и получена картина распределения магнитной индукции в рабочем зазоре МЖГ. По результатам расчёта определялся критический перепад давлений [1, 2]. Для статического режима работы его величина вычислялась по формуле:

$$\Delta P_{cm} = M_{s0}(B_{max} - B_{min}),$$

где M_{s0} – начальная намагненность насыщения МЖ; B_{max} и B_{min} – максимальная и минимальная магнитная индукция под зубцом.

Размеры магнитной цепи МЖГ представлены на рис. 1.

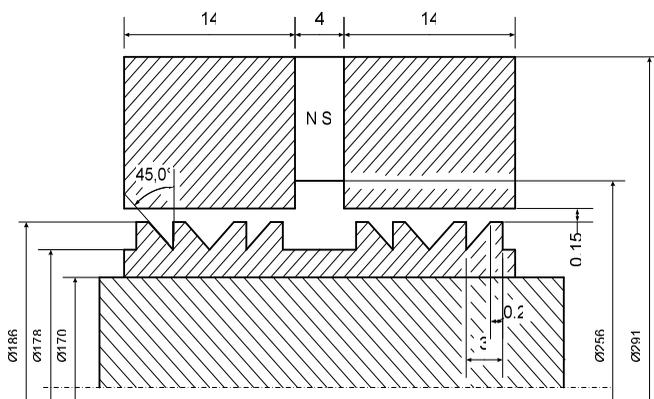


Рис. 1. Размеры магнитной цепи МЖГ

Результаты распределения магнитной индукции, полученные расчётным путём для магнитопровода МЖГ, изготовленного из стали марки Сталь 10, по высоте рабочего зазора, представлены на рис. 2.

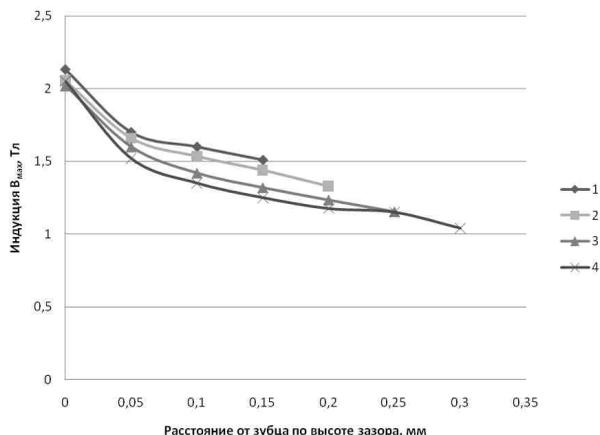


Рис. 2. Распределение магнитной индукции по высоте рабочего зазора: 1 – рабочий зазор 0,15 мм; 2 – рабочий зазор 0,2 мм; 3 – рабочий зазор 0,25 мм; 4 – рабочий зазор 0,3 мм

Экспериментальные исследования по определению критического перепада давлений МЖГ, проведёны на лабораторном стенде, который представляет собой макет узла МЖГ, вал которого вращался с заданной скоростью электродвигателем постоянного тока. Высокая сходимость результатов расчёта и эксперимента получена на скоростях вращения вала МЖГ до 5 – 7 м/с, при этом величина относительной погрешности составила 12 – 15 %, причём большее значение соответствовало экспериментальным результатам. При увеличении скорости вращения вала, до 12 – 15 м/с, величина относительной погрешности расчётных и экспериментальных результатов составляла 15 – 20 %, однако большие значения перепада давлений соответствовали результату расчёта. Это объясняется тем, что при больших скоростях вращения вала в расчётной модели по определению критического перепада давлений, не учитывается влияние центробежных сил действующих на МЖ в рабочем зазоре МЖГ. Кроме этого, при больших скоростях вращения вала происходит нагрев МЖ. Это приводит к снижению её намагниченности насыщения и, как следствие, уменьшению критического перепада давлений МЖГ.

Библиографический список

1. Сайкин, М.С. Особенности конечно-элементного моделирования электромеханических магнитоожидкостных герметизаторов / М.С. Сайкин // Электротехника и прикладная математика: сб. докл. науч. семинара. – Иваново, 2003. – С. 42 – 44.
2. Saykin, M. Seals Finite Elements Model on Nanomagnetic Liquids Basis / Michail Saykin // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering: 7th–International Symposium, Narva-Jõesuu, Estonia, June 15 – 20. – 2009. – P. 57 – 58.

СЕКЦИЯ 17

ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

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

Секретарь – ассистент **Зайцев Е.С.**

*С.В. Пахомова, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИСТОРИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Восьмидесятые годы прошлого столетия вошли в историю техники под названием периода «трансформаторных битв». Такое необычное название они получили потому, что изобретение трансформатора явилось одним из сильнейших аргументов в пользу переменного тока. А настоящая битва шла между сторонниками постоянного и переменного токов и отражала поиски путей выхода из назревшего энергетического кризиса, связанного с проблемой централизованного производства электроэнергии и передачей её на большие расстояния. Изобретение трансформатора – одна из замечательных страниц в истории электротехники. Прошло почти 120 лет после создания первого промышленного однофазного трансформатора, над изобретением которого трудились начиная с 30-х и до середины 80-х годов XIX века ученые, инженеры разных стран.

Для создания трансформаторов необходимо было изучение свойств материалов: немагнитических, металлических и магнитных, создания их теории.

В 1831 году английским физиком Майклом Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции, лежащее в основе действия электрического трансформатора, при проведении им основополагающих исследований в области электричества. Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах Фарадея и Генри (рис. 1). Однако ни тот, ни другой не отмечали в своем приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока

Создание трансформатора стало возможным после открытия явления электромагнитной индукции выдающимися учеными первой половины XIX в. англичанином М. Фарадеем (1831) и американцем Д. Генри.

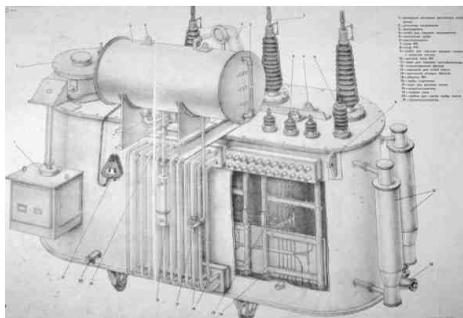


Рис. 1. Схематичное изображение трансформатора в работах Фарадея и Генри

Можно считать, что устройство Фарадея представляло собой прообраз современного трансформатора. Но ни Фарадей, ни Генри не были изобретателями трансформатора.

В 1848 году французский механик Г. Румкорф изобрёл индукционную катушку. Она явилась прообразом трансформатора. Первыми электрическими приборами, в которых использовалось явление электромагнитной индукции, были индукционные катушки. Катушка Румкорфа – устройство для получения импульсов высокого напряжения. Состоит из цилиндрической части с центральным железным стержнем внутри, на которую намотана первичная обмотка из толстой проволоки.

30 ноября 1876 года – дата получения патента Яблочковым Павлом Николаевичем – считается датой рождения первого трансформатора. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки.

В дальнейшем конструкцию трансформаторов разрабатывал другой русский изобретатель И.Ф. Усагин, который предложил применять трансформаторы для питания не только свечей Яблочкова, но и других приемников. Для развития трансформаторостроения и вообще электромашиностроения большое значение имели работы профессора А.Г. Столетов по исследованию магнитных свойств стали и расчёту магнитных цепей. Важная роль в развитии электротехники принадлежит М.О. Доливо-Добровольскому. Трёхфазный трансформатор современной формы с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости, был сконструирован им в 1891 г. С тех пор происходило дальнейшее конструктивное усовершенствование трансформаторов, уменьшалась их масса и габариты, повышалась экономичность. Основные положения теории трансформаторов были разработаны в трудах Е. Арнольда и М. Видмара. В развитии теории трансформаторов и совершенствовании их конструк-

ции большое значение имели работы советских ученых В.В. Корицкого, Л.М. Пиотровского, Г.Н. Петрова, А.В. Сапожникова, А.В. Трамбичко и др.

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон.

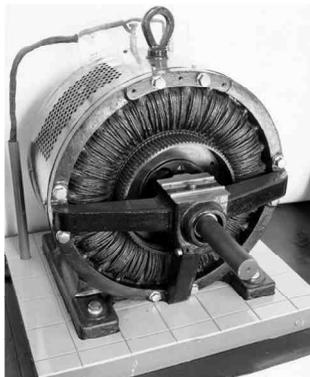


Рис. 2. Трехфазный асинхронный двигатель

С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току. Русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский в 1889 г. предложил трехфазную систему переменного тока, построил первый трехфазный асинхронный двигатель и первый трехфазный трансформатор (рис. 2).

В 1889 г. он изобрел удивительно простой трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, конструкция которого в принципе сохранилась и до наших дней. Но для передачи электроэнергии при высоком напряжении нужно было три однофазных трансформатора, что значительно удорожало всю установку. В том же 1889 г. Доливо-Добровольский, проявив незаурядные способности изобретателя, создает трехфазный трансформатор.

XX столетие характеризуется быстрым ростом промышленности и транспорта на базе электрификации. К трансформаторам и электрическим машинам предъявляются более высокие требования в отношении повышения их экономичности, уменьшения массы и габаритов. Осуществление плана ГОЭЛРО (1920 г.) требовало производства новых, более совершенных трансформаторов и электрических машин. Советская электропромышленность за короткий промежуток времени прошла путь, который зарубежная техника проходила в течение почти полувека. К 1931 г. план ГОЭЛРО был перевыполнен.

1928 год можно считать началом производства силовых трансформаторов в России, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии – Московский электрозавод).

В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург Роберт Хедфилд провел серию экспериментов для установления влияния добавок на свойства железа. Лишь через несколько лет ему удалось поставить заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния.

Электрификация всегда являлась основой научно-технического прогресса. На ее базе непрерывно совершенствуются технологии в промышленности, транспорте, сельском хозяйстве, связи и строительстве. Невиданных успехов достигла механизация и автоматизация производственных процессов. Достижения мировой энергетики были бы невозможны без внедрения разнообразных и высокоэкономичных силовых и специальных трансформаторов.

Но из объективных законов развития науки и техники следует, что какие бы совершенные конструкции ни были созданы сегодня, они являются лишь ступенью на пути создания еще более мощных и уникальных трансформаторов.

Библиографический список

1. **Алексенко, Г.В.** Параллельная работа трансформаторов и автотрансформаторов / Г.В. Алексенко. – 1967.
2. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.
3. **Костыков, Ю.В.** Первая книга радиолюбителя / Ю.В. Костыков, Л.Н. Ермолаев. – М.: Воениздат МО СССР, 1955.

*Л.М. Загорюкина, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

НЕИЗВЕСТНЫЕ ГЕРОИ ВОЙНЫ ТОКОВ

В настоящее время при поиске информации о противостоянии, получившем название «война токов», большинство литературных источников [5] и электронных ресурсов [3] предоставляют справочные данные лишь о некоторых его участниках. Так согласно [3] война токов сводится к противостоянию двух великих учёных Томаса Эдисона и Николы Тесла, заручившегося поддержкой миллионера Джорджа Вестингауза, в борьбе за использование постоянного или переменного тока соответственно.



В приведённом определении фигурируют учёные, имена которых всем хорошо известны ещё со школы. Однако столь серьёзный по масштабу конфликт не мог возникнуть между одиночными изобретателями. Все учёные того времени, работавшие с переменным или постоянным током, разбились на два лагеря и всеми силами старались показать преимущества своих идей. Некоторые пошли путем инноваций, некоторые же совершенствовали уже существующие аппараты.

Одним из малоизвестных в России изобретателей является создатель теории цепей переменного тока немецкий учёный Чарльз Штейнмец (1865 – 1923), ставший впоследствии главным инженером и руководителем проектов крупных электрических машин и аппаратов «Дженерал электрик» (GeneralElectric). Являясь сторонником использования переменного тока, учёный проводил научные исследования и совершил ряд открытий, способствовавших привлечению потребителей на свою сторону.

Большое значение имеют достижения Штейнмеца в области исследования магнитного гистерезиса, являющегося причиной потерь мощности в магнитных материалах, используемых в электрических машинах. Проанализировав значительное число образцов железа с точки зрения соотношения между энергией, затраченной на гистерезис, и максимальной индукцией за один цикл, Штейнмец открыл закон гистерезиса [6], позволивший инженерам заранее рассчитывать и тем самым минимизировать потери электроэнергии, что ранее было возможно только после их создания.

Ещё одним важным вкладом учёного в развитие электротехники стало создание символического метода расчёта цепей переменного тока, основанного на применении к расчётам комплексных чисел. Впервые данный метод был представлен в 1893 году на Международном Электрическом конгрессе. В 1897 году совместно с Э. Бергом он написал книгу по теории вычислений цепей переменного тока [2]. Кроме того Штейнмец является создателем теории переходных процессов, открывшей путь к созданию устройств защиты линий высокой мощности от попадания молний.

Часть разработок Штейнмеца была сразу же одобрена современниками, другие же идеи были несколько сложными для понимания большинства, так как выведение и доказательство требовали хорошего владения аппаратом высшей математики, которую, как правило, инженеры знали нетвёрдо и очень недостаточно [6]. Учёный приложил все усилия для исправления этой ситуации, чему немало способствовали многочисленные лекции на эту тему, прочитанные Штейнмцем, и его книга «Математика для инженеров» (Engineering Mathematics, 1910) [4].

Диапазон научных и экспериментальных исследований Штейнмеца поразителен, он практически охватил все важнейшие направления силь-

ноточной электропромышленности. Среди патентов на его изобретения – генераторы и электродвигатели, трансформаторы, разрядники, электро-термические и светотехнические устройства, выпрямительная техника.

Став главным инженером компании «Дженерал электрик», учёный получил более широкие возможности для своей исследовательской деятельности и внедрений своих устройств в промышленность. Впоследствии представители компании именно его называли главным своим оборудованием, имея в виду его невероятную изобретательность и разносторонность взглядов.

Работы Штейнмеца в области исследования переменного тока сыграли важную роль в становлении современной электротехники. Его многочисленные открытия и изобретения в значительной степени способствовали использованию переменного тока для питания потребителей.

Война токов закончилась лишь несколько лет назад, когда в Нью-Йорке исчез последний потребитель постоянного тока. В ноябре 2007 года главный инженер «Консолидейтед Эдисон» перерезал символический кабель, положив конец этому противостоянию.

Библиографический список

1. **Война** токов [Электронный ресурс] / М. Строкань. – Режим доступа: URL: <http://www.ushistory.ru>.
2. **Штейнмец** Чарльз Протеус [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://dic.academic.ru>.
3. **Война** токов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://ru.wikipedia.org>.
4. **Штейнмец** Чарльз Протеус [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:<http://enc-dic.com>.
5. **Хакинг, С.** Тесла против Эдисона. Война великих изобретателей. / СкарлетХакинг; пер. с англ. Т. Зеленской. – М.: Яуза пресс. 2009. – 480 с.
6. **Белькинд, Л.Д.** Чарльз Протеус Штейнмец / Л.Д. Белькинд. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

*А.Р. Аргунов, М.А. Тимонов, студенты;
В.М. Киселев, к.т.н.
(ЯКСЭ, г. Якутск)*

ИСТОРИЧЕСКИЕ СТЕРЖНИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ЯКУТИИ

Актуальность темы, цели и задачи определяются необходимостью подготовки учебного материала для углубленного изучения профессио-

нального модуля «Техническое обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем» специальности 140407 «Электрические станции, сети и системы».

Развитие электроэнергетики в Республике Саха (Якутия) зависит от целого ряда технико-экономических факторов, в том числе и от уровня подготовки специалистов электроэнергетической специальности в колледже. В связи с этим возникла необходимость не только усвоения учебного материала теории и практики, но и изучение вопросов развития региона в настоящее время и в перспективе, опираясь на исторические основы сложившиеся в отрасли электроэнергетики Республики Саха (Якутия).

Исследование вопроса развития электроэнергетики проводилось на основании многовековой истории освоения Якутии с колоссальными запасами природных богатств. Известно, что на северные территории приходится более 60 % прогнозных запасов природного газа, 75 % запасов угля и основных гидроэнергетических ресурсов, более 30 % лесных массивов. При этом многие разведанные природные ресурсы по своим запасам уникальны: энергетические (каменный и бурый угли, природный газ, нефть, гидроэнергия и лес), алмазы, апатиты, поваренная соль, ниобий, медь, известняк и др. В этом перечне Республика Саха (Якутия) занимает ведущие места. В ходе исследования было установлено, что выборочный метод освоения Севера привел к очаговому характеру развития промышленности с децентрализованным электроснабжением.

Исторически в промышленных районах РС(Я) на базе одной или нескольких электростанций сформировались местные районные энергосистемы: Колымская, Западно-Якутская, Южно-Якутская и Центрально-Якутская, Колымо-Магаданская. Все энергосистемы имеют свои распределительные сети напряжением 35, 110 кВ.

При этом отдельные удаленные промышленные предприятия и рудники базируются на автономных дизельных электростанциях с распределительными сетями напряжением 10 – 35 кВ, имеющих недостатки экономического и технического характера.

Электрические сети Якутской энергосистемы содержат: Центральные электрические сети (ЦЭС), Западные электрические сети (ЗЭС), Северные электрические сети (СЭС), Вилкойские электрические сети (ВЭС), Южно-Якутские электрические сети (ЮЯЭС) и Северо-восточные электрические сети (СВЭС). Предприятия входят в состав АК «ЯкутскЭнерго». Основным элементом электрических сетей являются линии электропередачи. Общая протяженность ВЛ 35 – 220 кВ в одноцепном исчислении и энергосистеме составляет 9 тыс. км, из них 91 % построены на инфицированных деревянных опорах. На металлических опорах построены

третья цепь Вилюйская ГЭС – Айхал протяженностью 350 км и ВЛ 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС – Нижний Куранах протяженностью 469 км.

Централизованная электроэнергетика Якутии сегодня представляет собой три автономно работающих энергорайона – Центральный, Западный и Южный. Строительство системообразующих ЛЭП напряжением 220 кВ, например в Южной Якутии между Нерюнгринской РЭС и Якутской ГРЭС (протяженностью 800 км), обеспечивает создание на территории Республики Саха (Якутия) объединенной электроэнергетической системы региона. Якутская ГРЭС – уникальная электростанция, работающая в условиях вечной мерзлоты на газовом и дизельном (для аварийного режима) топливе, не имеет аналогов в мире. Якутская ГРЭС была спроектирована в 1964 г. Начало строительства с 1965 года, в октябре 1970 года первая газовая турбина ГГИ-25-700-2 была принята в промышленную эксплуатацию. В период с октября 1969 – 1970 г.г. активное участие в подготовительных строительных работах принимали участие и студенты Якутского Электротехникума связи (ЯЭТС) под руководством преподавателей Киселева В.М., Кочеткова В.И.

С 1971 года, после ввода в работу последнего, четвертого агрегата является началом эксплуатации I-й очереди ЯГРЭС. С 1971 г. предприятие начало производить отпуск тепла для отопления и горячего водоснабжения жителей г. Якутска.



Рис. 1. Фото ЯГРЭС

В дальнейшем на Якутской ГРЭС с 1974 по 1985 г.г. проводились работы по сооружению второй очереди электростанции. После ввода

в 1985 г. последнего, 8-го газотурбинного агрегата станции достигла проектной мощности.

В настоящее время ЯГРЭС является одним из передовых предприятий города и республики по технико-экономическим показателям.

Региональная электроэнергетика Якутии получила значительное количественное и качественное развитие в последние два десятилетия в направлении централизованного электроснабжения. Схема объединения энергорайонов приведена на рис. 2.

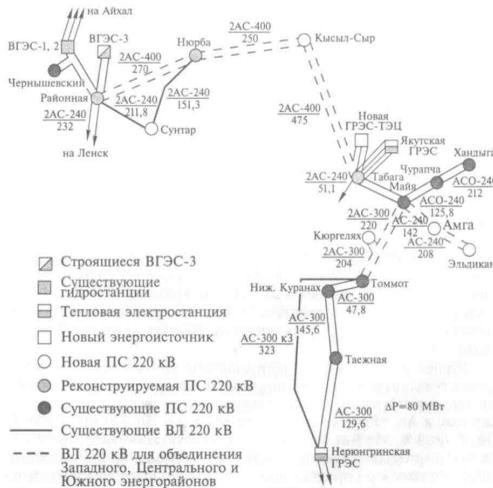


Рис. 2. Схема объединения энергорайонов Якутии



Рис. 3. Схема соединения Западного, Центрального и Южного энергорайонов Якутии

На основе проведенных исследований подготовлен учебный материал для углубленного изучения вопроса развития электроэнергетики в РС(Я). Для более успешного усвоения вопросов по тематике перспективного развития электроэнергетики РС(Я) был разработан и изготовлен электрифицированный стенд в лаборатории электрооборудования колледжа.

Выводы

1. Для обеспечения надежности и экономичности электроснабжения с максимальным использованием преимуществ централизованного электроснабжения необходимо формировать единую электроэнергетической систему (ЭЭС) Якутии.

2. Формирование учебного материала для углубленной подготовки студентов по специальности электроэнергетического профиля создает предпосылки успешной работы молодого специалиста на производстве.

Библиографический список

1. **Аргунов, Л.И.** Линии электропередачи Якутии / Л.И. Аргунов. – Якутск, 1976.
2. **Кобылин, В.П.** Повышение эксплуатационной надежности электросетевого хозяйства на севере / В.П. Кобылин. – Новосибирск: Наука, 2006.
3. <http://www.Yakutskenergo.ru/>.

А.Е. Басова, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, Иваново)

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Явление магнетизма было обнаружено еще задолго до нашей эры, когда, согласно легенде, пастух по имени Магнус заметил, что железный наконечник его палки и гвозди сапог притягиваются к черному камню. Этот камень стали называть «камнем Магнуса» или просто «магнитом», по названию местности, где добывали железную руду (холмы Магнезии в Малой Азии). Однако первое научное изучение свойств магнита было предпринято лишь в 13 веке ученым Петром Перегрином. В 1269 году вышло его сочинение «Книга о магните», где он писал о многих фактах магнетизма: у магнита есть два полюса, которые ученый назвал северным

и южным; невозможно отделить полюса друг от друга разламыванием. Перегрин писал и о двух видах взаимодействия полюсов – притяжении и отталкивании.

В 1600 году вышло сочинение английского врача Уильяма Гильберта «О магните», в котором были добавлены к известным ранее фактам новые важные наблюдения: усиление действия магнитных полюсов железной арматурой, потерю магнетизма при нагревании и другие.

Изготовление сильных постоянных магнитов стало возможным после открытия Эрстедом явления электромагнетизма (1820 г.) и изготовления Уильямом Стердженем в 1825 г. Первого электромагнита. С начала XX века и по настоящее время приборостроение является основным потребителем постоянных магнитов. Спрос на магниты породил интенсивные поиски подходящих материалов и разработку методов расчёта постоянных магнитов.

Магнитные свойства постоянных магнитов характеризуются следующими величинами:

-остаточная индукция (B_r) – определяет величину индуцируемого магнитом поля;

-коэрцитивная сила (H_c) – характеризует устойчивость магнита к размагничиванию;

-максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}$ – характеризует удельную потенциальную энергию магнита (мощность магнита).

Начало XX века характеризуется применением для постоянных магнитов вольфрамовой, хромовой и кобальтовой сталей, обладающих высокими значениями остаточной индукции, но недостаточной коэрцитивной силой и, естественно, незначительной удельной энергией.

Тридцатые годы характеризуются разработкой сплавов альнико (ЮНДК) с высоким значением удельной энергии, так как они обладают большими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы. Появление этих сплавов расширило область применения магнитов, обеспечив их использование в поляризованных реле и других устройствах автоматики и связи.

Пятидесятые годы характеризуются разработкой магнитно-твердых ферритов, обладающих очень высоким значением коэрцитивной силы при низкой остаточной индукции и в силу этого значительно меньшей, чем у альнико, удельной энергией. Однако небольшая стоимость позволила широко применять ферритовые магниты в устройствах автотракторного электрооборудования, а высокая коэрцитивная сила – успешно использовать их в магнитной оптике радиоэлектронных устройств.

Семидесятые годы характеризуются разработкой редкоземельных материалов на основе соединений редкоземельных металлов, например

самария с кобальтом, обладающих очень высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции. В зависимости от процентного соотношения химических элементов, строения кристаллической решётки получают магниты с различными магнитными свойствами. В конце двадцатого века развивается производство магнитов на основе сплава неодим-железо-бор с добавлением, например, тербия.

Перечисленные типы магнитов имеют различный технологический процесс изготовления. Так, например, ферритобариевые магниты получают литьём, а редкоземельные магниты спеканием.

Магниты обладают не только различными магнитными свойствами, но имеют различную механическую прочность, возможность механической обработки на станках, различную степень зависимости магнитных свойств от температуры и пространственного направления.

В табл. 1 приведены магнитные свойства некоторых постоянных магнитов.

Таблица 1. Магнитные свойства различных типов постоянных магнитов

Тип магнита	Остаточная индукция (Br), Тл	Коэрцитивная сила по индукции (Hc), кА/м	Максимальное энергетическое произведение (BxH), кДж/м ³
Магниты из сплава ЮНДК	0,8 – 1,2	40 – 145	6 – 40
Феррито-бариевые магниты	0,3 – 0,4	120 – 225	6 – 18
Магниты из сплава Sm-Co ₅	0,77 – 1,15	540 – 1000	60 – 160
Магниты из сплава Nd-Fe-B	0,8 – 1,3	460 – 860	60 – 140

Большое разнообразие выпускаемых магнитов, обладающих различными физическими свойствами, позволяет использовать их в технических объектах и устройствах для решения поставленных задач.

Постоянные магниты применяются в электрических машинах небольшой мощности, в устройствах омагничивания воды и других жидкостей, в магнитных сепараторах, подшипниках, магнитожидкостных узлах.

Библиографический список

1. **Постоянные** магниты: справ. / под ред. Ю.М. Пятина. – М.: Энергия, 1980 – 488 с.
2. **Преображенский, А.А.** Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.
3. **ТУ 49-0531-384-88.** Магниты. На основе сплава неодим-железо-бор марки ЧЗ6Р. Технические условия. Введ. 01.10.88 – Пышменский опытный завод «Гиредмет».

*А.О. Любимова, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Каждое поколение застает технику на том уровне, до которого она была доведена в предыдущий период, дополняет ее своими открытиями, изобретениями, устройствами, а затем передает следующему поколению.

Применение электричества и использование электроэнергии было великим открытием XIX века. Следует заметить, что электрическая энергия является вторичной энергией и не заменяет первичную (тепловую, гидравлическую, водяную и др.), но стимулирует развитие первичной энергии, а для ее передачи и распределения – самой удобной признана именно электрическая энергия.

Ивановская область, пожалуй, самая маленькая по площади из субъектов Российской Федерации. Но как говорится: «Мал золотник, да дорог!» В 1918 году, во время своего исторического образования, это был третий по значимости промышленный регион России, уступающий по концентрации производства, лишь Москве и Санкт-Петербургу.

Энергосистема Ивановской области является одной из старейших в России. Первые электросиловые установки на текстильных предприятиях Иваново-Вознесенска появились еще в 1890 году. Они использовались не только в промышленных целях, но и для электрического освещения помещений администрации и производства.

Первым электрифицированным городом на территории Ивановской области считается Шуя. В 1909 году, Шуя имела свою электростанцию и освещалась 95 дуговыми фонарями по 850 свечей каждый.

При крупных фабриках находилась одна или несколько электрических установок. К 1912 году их число в Иваново-Вознесенске достигло 20 единиц. Основным производным материалом этих силовых установок был пар. Электричество получалось как побочный продукт и использовалось на освещение производственных помещений, контор, рабочих барачков и прилегающих улиц.

По плану ГОЭЛРО, в начала февраля 1920 года, первой в Иваново-Вознесенской губернии была построена Государственная районная электрическая станция (ИвГРЭС). Одновременно с ней для электрификации текстильного края была построена и первая кольцевая воздушная линия электропередачи 110 киловольт, проходящая последовательно через Иваново, Середу (ныне Фурманов), Плес, Семигорье (Вичугский район), Наволоки, Кинешму, Вичугу, Родники, Шую и обратно на ИвГРЭС.

Построенные линии связали энергосистему ИПО (Ивановской промышленной области) с энергосистемами Московской, Нижегородской, Северной и Ленинградской областей.

В первой половине 1930-х годов линиями на 110 кВ была охвачена большая часть территории Центрально-Промышленного района.

Но был ряд проблем, которые необходимо было решить. В первую очередь требовалось усиление линий ИвГРЭС – Тейково – Иваново, Иваново – Шуя, Шуя – Ковров, Серeda (Фурманов) – Вичуга. Такой важный город-порт на Волге, как Кинешма, не имел постоянной подстанции. Электроснабжение производилось от дизельных установок местных фабрик, крайне изношенных и ненадежных. Ивановская высоковольтная сеть также была нестабильна. Основные производственные потребители не имели резервного электроснабжения. Ощущалась нехватка цветного металла.

К началу Великой Отечественной войны электроэнергетика области находилась в состоянии дефицита. Дефицит к лету 1941 года составлял 25 МВт.

Сетевое предприятие того времени называлось Ивэлектросеть и входило в состав районного энергетического управления (РЭУ) «Ивэнерго». Перед сетевым предприятием стояла очень трудная задача: с минимальными потерями обеспечить надежное, бесперебойное электроснабжение работавших на оборону организаций. Работать приходилось при дефиците запчастей и рабочей силы. Но, тем не менее, стабильное электроснабжение заводов и фабрик было обеспечено.

В 1943 году протяженность воздушных линий электропередачи увеличилась на 132,4 км за счет постройки новых линий: Комсомольск – Нерехта, Комсомольск – Иваново, Шуя – Южа, Иваново – Шуя. Межсистемная ВЛ была построена в рекордно короткие сроки – 2 месяца – зимой с 31 октября 1942 года по 1 января 1943 года.

В 50 – 60 годы была осуществлена электрификация значительной части сельхозпредприятий, которое к тому времени занимал весьма тяжелое положение. Этот вопрос решался за счет постройки ЛЭП 110 кВ (Горьковская ГЭС – г. Кинешма, подстанция в Юрьевецком районе). Данный процесс завершился к 1965 году.

В эти годы Ивановская энергетическая система входила в Единую энергетическую систему (ЕЭС) европейской части СССР и непосредственно была связана с четырьмя системами Мосэнерго, Горэнерго, Костромэнерго и Ярэнерго.

В 80-е годы активно реформируются новые сетевые предприятия РЭУ «Ивэнерго». В 1977 году на базе предприятий «Ивэлектросети» и «Ивсельэлектросети» создано «Ивановское предприятие электрических сетей». На базе Восточного высоковольтного района образуется «Кине-

шемское предприятие электрических сетей». Этот же 1977 год – год образования «Тейковских электрических сетей».

В сентябре 1988 г. приказом министерства РЭУ «Ивэнерго» было упразднено и на его основе создано Ивановское производственное объединение энергетики и электрификации (ПОЭиЭ) «Ивэнерго». В его состав вошли: ИвГРЭС, ИвТЭЦ-2, ИвТЭЦ-3, Ивгортеплосети, Ивэнергоремонт, Ивэлектросети, Кинешемские электросети, Тейковские электросети, Ивэнергоспецремонт, Автохозяйство, предприятие Энергонадзор.

С 1990 года предприятие начинает переход на новую форму экономической деятельности – регулируемые рыночные отношения. В 1992 году «Ивэнерго» стало открытым акционерным обществом, как дочернее общество ОАО «РАО ЕЭС России».

С момента образования и до реорганизации в 2005 году, «Ивэнерго» обслуживало Ивановскую область площадью 21,4 тыс. кв. км с населением 1 192 тысяч человек. Оно обеспечивало электроэнергией промышленные, сельскохозяйственные и коммунальных потребителей на всей территории области, а теплом и паром большинство потребителей городов Иванова, Кохмы и Комсомольска.

С 1 марта 2008 года «Ивэнерго» – филиал ОАО «МРСК Центра и Приволжья». На сегодняшний день успешно реализующий одну из главных стратегических задач операционной компании – увеличение работ по реконструкции и техническому перевооружению электросетевого комплекса.

Основные задачи филиала «Ивэнерго» – передача электроэнергии, обеспечение надежного функционирования и развития распределительного электросетевого комплекса региона и присоединение потребителей.

Библиографический список

1. **Электроэнергетика** в экономической истории Ивановской области (1890-е – 2008 гг.) / В.С. Околоты., А.В. Сироткин. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2008. – 559 с.

*Л.В. Сидорова, студ.; рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СВЕТ В МОЕМ ОКОШКЕ

Одним из величайших изобретений человечества, является электрическая лампочка. История появления и развития электрической лампы неотделима от истории электротехники, которая начинается с открытия

электрического тока в XVIII веке. После этого по всему миру прокатилась волна открытий, связанных с электричеством. Пошла своеобразная цепная реакция, когда одно открытие порождало следующее. Как известно, приоритет изобретения лампочки оспаривался многими лицами, и по поводу него возникало много споров и патентных процессов. Впервые лампа накаливания появляется на улицах и площадях, но потом с молниеносной быстротой проникает в каждый дом и становится неотъемлемой частью человеческой жизни.

На начальных этапах развития получили распространение два типа электрических ламп: лампы накаливания и дуговые. Дуговые лампочки появились чуть раньше, их свечение основано на таком явлении, как вольтова дуга. Если взять две проволоки, подключить их к достаточно сильному источнику тока, соединить, а затем раздвинуть на расстояние нескольких миллиметров, то между концами проводников образуется нечто вроде пламени с ярким светом.

Впервые явление вольтовой дуги обнаружил в 1803 году русский ученый Василий Петров, затем в 1810 году то же открытие сделал английский физик Деви. Получив вольтову дугу, они решили, что вольтова дуга может использоваться в целях освещения. Но стержни из древесного угля сгорали за несколько минут, и по мере выгорания электродов надо было постоянно подвигать их навстречу друг другу. Если расстояние между ними превышало некий допустимый минимум, свет лампы становился неровным, она начинала мерцать и гасла. Требовался механизм-регулятор для поддержания постоянного расстояния между электродами, а так же материал, пригодный для изготовления ламп. Изобретатели предлагали разные решения, но все они имели недостаток: нельзя было включить несколько ламп в одну цепь. Приходилось использовать для каждого светильника свой источник питания. Эта проблема решилась в 1856 году. А.И. Шпаковский создал осветительную установку с 11 дуговыми лампами, снабженными оригинальными регуляторами.

Первую дуговую лампу с ручным регулированием длины дуги сконструировал в 1844 году французский физик Фуко. Новшеством стало то, что древесный уголь он заменил палочками из твердого кокса. Затем были придуманы различные приспособления, управляемые часовым механизмом, которые автоматически сдвигали электроды по мере их сгорания. Более приемлемое решение было найдено Яблочковым. Он располагает угольные электроды – не горизонтально, как во всех прежних конструкциях, а параллельно. Теперь оба электрода будут выгорать совершенно одинаково, и расстояние между ними будет всегда постоянным. Свеча Яблочкова состояла из двух стержней, изготовленных из плотного роторного угля, и разделенных гипсовой пластинкой. Она служила и

для скрепления углей между собой и для их изоляции. Эти лампы требовали для работы исключительно переменного тока, так как скорость сгорания положительного и отрицательного электродов в них была неодинаковой, и при постоянном токе надо было делать положительный электрод толще. Несмотря на улучшения, существенным недостатком была малая продолжительность работы ламп – около 2 часов.

Многие изобретатели высказывали мысль заключить вольтову дугу в лишенную кислорода атмосферу, благодаря этому лампа могла бы гореть значительно дольше. Однако они пытались выкачать воздух целиком из всей лампы и не могли достигнуть нужного результата. Американец Джандус первый придумал помещать под купол не всю лампу, а только ее электроды. Такая лампа могла работать до 200 часов.

Дуговые лампы использовались для освещения больших залов, вокзалов или площадей. Но они были совершенно непригодны для применения в маленьких жилых или рабочих помещениях, в отличие от ламп накаливания.

Лампы накаливания наиболее популярны и их устройство всем известно: электрический ток, проходя через тонкую нить, раскаливает ее до высокой температуры, благодаря чему она начинает ярко светиться. Еще в 1820 году французский ученый Деларю изготовил первую такую лампу, в которой накаливаемым телом служила платиновая проволока. Затем лампы накаливания почти не использовались, поскольку не могли найти подходящего материала для нити. Затем над изобретением лампочки стал работать А.Н. Лодыгин. В качестве нити накала он пытался использовать железную проволоку, но потерпел неудачу. Опыты со стальной спиралью тоже оказались неудачными: лампа светила тускло и быстро перегорала. Позднее наиболее удобным оказался уголь, и ученый заменил проволоку угольным стержнем. Такая лампочка появилась в 1873 году. Он же первый начал откачивать из баллона воздух, благодаря этому приему уголь светился ярче и не перегорал на протяжении нескольких часов. В 1890-х годах XIX века он изобрел несколько типов ламп накаливания с металлическими нитями, и первый предложил применять в лампах вольфрамовые нити, которые применяются и по сей день.

В 1878 году американские электротехники Сойер и Манн нашли способ изготавливать маленькие угольные дуги небольшого сечения путем обугливания картона в графитовом порошке. Эти дуги заключали в стеклянные колпачки. Однако и эти лампочки были очень недолговечны.

В 1879 году за усовершенствование электрической лампочки взялся знаменитый американский изобретатель Эдисон. Сначала Эдисон заменил ломкий бумажный уголек более прочным, приготовленным из угля,

потом стал делать опыты с различными металлами и наконец остановился на нити из обугленных бамбуковых волокон. Это была первая лампочка с продолжительным сроком службы, пригодная для массового производства. Изготовление нитей из бамбука оказалось достаточно дорогим, и Эдисон разработал новый способ выделки их из обработанных волокон хлопка. Средняя долговечность лампочки Эдисона составляла 800 – 1000 часов непрерывного горения. Около 30 лет лампочки изготавливались описанным Эдисоном способом, но будущее было за лампочками с металлической нитью. В 1910 году американский физик Ленгмюр предложил заменить вольфрамовую нить скрученной в тонкую спираль, что позволило уменьшить габариты стеклянной колбы, улучшить режим работы лампы и увеличить светоотдачу.

Несмотря на сравнительно недавнее изобретение лампы накаливания, эпоха привычной электрической лампочки близится к завершению. Наука не стоит на месте и постоянно развивается. Последние годы все большее применение находят энергосберегающие лампочки. Таким образом, газоразрядные лампы в последние годы завоевывают все большую популярность, но им пока не удается превзойти обыкновенную «лампочку Ильича».

*А.А. Пробичева, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

«ЛЕЙДЕНСКАЯ БАНКА»: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсаторы являются неременным элементом любых электронных схем, от простых до самых сложных. Трудно себе представить какую бы то ни было электронную схему, в которой не используются конденсаторы. За два с половиной века своего существования они весьма значительно изменили свой облик и сегодня отвечают всем требованиям современной технологии.

Принципы изготовления конденсаторов стали известны еще 250 лет назад, когда в 1745 г. в Лейдене немецкий физик Эвальд Юрген фон Клейст и нидерландский физик Питер ван Мушенбрук создали первый конденсатор – «лейденскую банку». В ней диэлектриком были стенки стеклянной банки, откуда и возникло название. Эти принципы не изменились до сих пор, однако совершенствование технологий и применение

новых материалов позволили значительно улучшить конструкцию конденсаторов. Суммарный заряд, который мог накапливаться в лейденской банке емкостью 1 литр, теперь можно «уместить» в устройстве размером не больше булавочной головки.

Мало кому известно, что наш великий электротехник Павел Николаевич Яблочков, изобретший дуговую лампу особой конструкции, одновременно занимался разработкой и использованием конденсаторов и достиг выдающихся результатов. Основные работы по конденсаторам отражены в его публикациях (докладах и патентах) 1877 – 1880 гг. Так, во французском патенте № 120684, выданном П.Н. Яблочкову 11 октября 1877 г., речь идет о лейденских банках и «конденсаторах особых типов». Для примера на рис. 1 представлена батарея лейденских бутылок с проводящей жидкостью. Из бутылок выступают стержневые выводы, соединенные между собой. От сосуда отходит другой общий вывод.

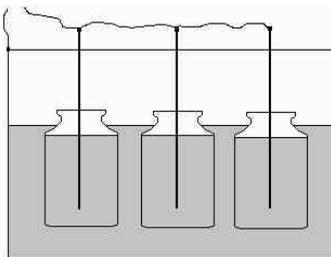


Рис. 1. Батарея лейденских бутылок с проводящей жидкостью

В этом патенте для нас наибольший интерес представляют «конденсаторы особых типов» в виде стопки (блока) металлических пластин (или полосок фольги) с находящимися между ними изоляционными слоями (пластинами), при этом четные металлические пластины полоски фольги соединены между собой общим проводником, а нечетные другим (рис. 2).

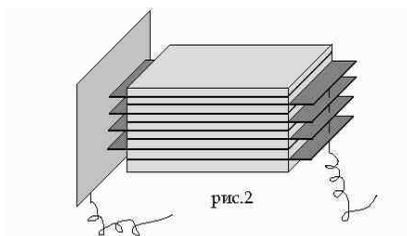


Рис. 2. «Конденсаторы особых типов»

П.Н. Яблочков указывает, что такие блоки можно соединять друг с другом параллельно или последовательно. Блочная (пакетная) конструкция, предложенная им, впоследствии нашла широкое применение.

В конце 1877 и в начале 1878 г. П.Н. Яблочков демонстрировал конденсаторы, предназначенные для его системы электрического освещения. Они представляли собой свернутые в рулон листы оловянной фольги, разделенные слоями пластыря и гуттаперчи. В реферате доклада П.Н. Яблочкова отмечалось, что такие конденсаторы «позволяют получать в небольшом объеме громадные электрические мощности».

В дополнении от 12 октября 1878 года цитированному выше патенту № 120684 Павел Николаевич Яблочков заявляет свои права на «металлические листки, покрытые изолирующим веществом, специально в целях устройства конденсатора посредством погружения таких изолирующих пластин в жидкость, содержащуюся в резервуаре».

Работы П.Н. Яблочкова по конденсаторам относятся к тому периоду времени, когда только начиналось их промышленное применение в телеграфии. Яблочков одним из первых включил конденсатор в цепь переменного (по русской терминологии того времени – перемежающегося) тока. Изучение работы конденсатора на переменном токе имело важнейшее значение для становления и развития электротехники, а в последствии и радиотехники.

Сейчас существует множество видов и разновидностей конденсаторов. Но в основе своей они все повторяют простейший конденсатор, который образуют две металлические пластины, изолированные одна от другой (рис. 3).

Чаще всего пластины называют обкладками, а изолирующий слой – диэлектриком.

Прообразом современных конденсаторов, как уже было сказано, была лейденская банка. В 1746 г. ее усовершенствовал английский ученый, астроном и физик Дж. Бевис. Лейденская банка представляет собой стеклянный сосуд, внутренняя и наружная поверхность которого покрыты двумя листами фольги. Через резиновую пробку в сосуд вставлен металлический стержень так, что он касается внутреннего листа фольги. Внутренний и наружный листы фольги, в обычных условиях имеющие нейтральный заряд, играют роль электродов, если их подсоединить к внешнему источнику электрических зарядов.

Источником зарядов может быть электрическая батарейка, генератор или простая эбонитовая палочка, потертая о шерсть или мех. Если та-

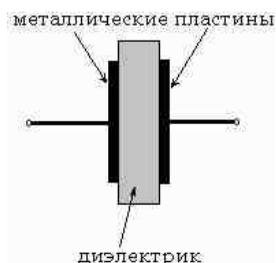


Рис. 3. Простейший конденсатор

кой палочкой, несущей в себе свободные электроны, коснуться металлического стержня в горлышке сосуда, электроны перетекут с палочки на внутренний электрод. Таким образом отрицательный заряд будет перенесен на внутренний электрод. Поскольку способность накапливать заряды у сосуда ограничена их взаимным отталкиванием, их переход на электрод не может быть бесконечным. Способность накапливать или удерживать заряды называется ёмкостью.

Имеются два пути увеличения емкости лейденской банки. Один из них заключается в увеличении площади электродов, чтобы дать возможность зарядам рассредоточиться в большем пространстве и тем самым уменьшить силу взаимного отталкивания электронов. Другой путь – уменьшить толщину стеклянной стенки сосуда, разделяющей заряды, скапливающиеся на внутреннем и внешнем электродах. Не надо забывать при этом, что если стекло будет слишком тонким, электроны смогут пройти сквозь него, создавая искровой разряд, что приведет к рассеянию заряда.

Оба пути в лейденской банке трудно реализовать, но они входят в число трёх классических способов, к которым прибегают современные ученые и инженеры при разработке новых конструкций конденсаторов.

Электролитический конденсатор можно уподобить лейденской банке из очень тонкого стекла, уменьшенной до размеров небольшого куба. Он изготавливается из куска металла с 60 %-ной пористостью. Для большинства современных электролитических конденсаторов используют измельчённый тантал – твердый металл серого цвета. Порошок тантала спрессовывается и затем в течение нескольких часов полученную заготовку нагревают в вакуумной камере до температуры, близкой к 2000 °С. В результате частицы металла спекаются, плотно сцепляясь друг с другом. Образующие при этом небольшие ниши и щели в толще спрессованного порошка повышают поверхность заготовки, которая потом будет служить одной из обкладок конденсатора. Затем в электролитической ванне заготовку подвергают анодированию, чтобы на поверхностях пор получить изолирующий слой оксида тантала. Потом заготовку погружают в раствор нитрата марганца. В ее порах после нагрева осаждаются частицы полупроводящего диоксида марганца, слой которых играет роль одной обкладки, а танталовые частицы под слоем оксида тантала – другой обкладки. Конденсатор сначала покрывают графитовой, потом серебряной краской, напыляют слой никеля и заделывают в корпус.

Несмотря на то, что электролитические конденсаторы имеют наибольшую удельную ёмкость по сравнению с другими типами конденсаторов, область их применения ограничена. Во-первых, это объясняется тем, что подводимое к нему напряжение должно иметь определённую полярность, которую нельзя менять. Эта особенность допускает исполь-

зование электролитических конденсаторов только в цепях постоянного тока. Во-вторых, электролитические конденсаторы более подвержены пробою, поскольку слои диэлектрика в нём очень тонкие.

Библиографический список

1. **Справочник** по электротехническим материалам. Т. 3. – Л. Энергия, 1988.
2. **Конденсаторы:** справ. – М.: Радио и связь, 1987.
3. **Носов, О.Н.** Оптоэлектроника / О.Н. Носов. – М.: Высш. шк., 1976.

*Е.А. Попова, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ

Развитие современных технологий усиливает зависимость человеческой деятельности от энергоснабжения во всех областях – и в доме, и на работе, и на отдыхе. Конечно, есть много уголков, куда не достают сети энергетических компаний, и там ещё сильнее становится зависимость от имеющихся источников электричества и тепла, или мечты о них.

Повсеместное распространение компьютеров только повышает требования к энергоснабжению. Не только «количество», но и «качество» электроэнергии становятся критичными для банков, телекоммуникационных или промышленных компаний. Скачок или сбой напряжения могут повлечь сегодня не просто остановку или порчу машины, но и потерю информации, восстановление которой иногда несравнимо сложнее ремонта оборудования.

Требования к энергоснабжению формулируются просто – надёжность, постоянство. И для многих становится ясно, что на сегодня единственный путь иметь продукт высшего качества – произвести его самому.

Разбросанное по подвалам и задним дворам энергетическое оборудование, установленное владельцами на случай аварий в централизованных сетях, или в условиях отсутствия этих сетей, начинает восприниматься в мире как формирующаяся целостность – основа для возникновения новой отрасли, получившей название распределённой генерации (distributed generation), РГ или DG.

В отсутствии общепринятого классического определения, к распределённой генерации относят объекты, удовлетворяющие совокупности

следующих признаков: расположены в непосредственной близости к потребителям; вырабатывают электроэнергию/тепло/холод в объемах, необходимых и достаточных для конкретных потребителей (как правило, в диапазоне от 15 – 100 кВт до 20 – 50 МВт); для выработки энергии используют дизельные, газопоршневые и газотурбинные генераторы, топливные ячейки; работают, соответственно, на жидком или газообразном топливе; принадлежат непосредственно потребителям или относительно небольшим независимым распределенным генерирующим компаниям. На сегодняшний день в России можно выделить три категории генерирующих мощностей, которые подпадают под широкое определение распределенной генерации:

- блок-станции, источник электрической (иногда тепловой) энергии, расположенный на территории или в непосредственной близости от промышленного предприятия и принадлежащий владельцам этого предприятия на правах собственности или ином законном основании, например праве аренды. Блок-станции, как правило, выгодны их владельцам, поскольку могут функционировать за счет побочных продуктов основного производства (попутный или доменный газ и т.п.);

- теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). ТЭЦ и централизованное теплоснабжение населенных пунктов были гордостью советской энергетики. И действительно, комбинированное производство электроэнергии и тепла повышает коэффициент использования топлива (КИТ) в среднем на 30 %. На фоне этого эффекта существенные затраты и неудобства при сооружении и эксплуатации теплосетей становятся приемлемыми. Это одна из причин, по которым когенерация широко пропагандируется и поощряется сейчас на Западе;

- объекты малой и средней генерации, в числе которых газотурбинные и газопоршневые станции, а также пока еще малочисленные в России электростанции на возобновляемых источниках электроэнергии (ВИЭ).

Инвестиционная привлекательность и финансовая эффективность распределенных энергетических систем обусловлена относительно невысоким уровнем первоначальных вложений, возможностью быстрого и поэтапного ввода в эксплуатацию, полным контролем со стороны потребителя.

Основными достоинствами распределенных систем являются:

- высокая технологическая и экономическая эффективность. КПД свыше 90 % в режимах когенерации и тригенерации. Себестоимость вырабатываемой электроэнергии и тепла в два и более раз ниже сетевых тарифов за счет более эффективных технологий генерации, отсутствия транспортных потерь и накладных расходов. Срок окупаемости составляет около 5 лет (только электроэнергия) или до 2 – 4 лет при полной утилизации тепла в режимах когенерации и тригенерации.

- модульность, масштабируемость, мобильность. Поставка блоками необходимой мощности, возможность быстрого подключения новых блоков к уже работающей станции, а также их демонтажа и перемещения на новые объекты.

- короткие сроки ввода в эксплуатацию. Сроки строительства электростанции мощностью до 2 МВт не превышают 6 – 12 месяцев, для более мощных станций (10 – 20 МВт) может потребоваться 12 – 18 месяцев.

- независимость и контроль. Конечный потребитель и его подрядные организации полностью контролируют сроки возведения генерирующих объектов и процесс их эксплуатации. Полностью устраняется проблема сбоев, отключений, нарушений параметров тока и напряжения по не зависящим от потребителя причинам.

Препятствия для развития распределенной генерации:

- высокие таможенные пошлины на ввозимое из-за рубежа оборудование;
- сложности технического регулирования и лицензирования при строительстве объектов распределенной генерации. Тепловые электростанции, в том числе объекты распределенной генерации, относятся к опасным производственным объектам. Требуется не только подтверждение соответствия требованиям технического регламента о безопасности машин и оборудования, но и подтверждение соответствия требованиям по энергоэффективности;

- трудности при присоединении к электрическим сетям и оказании услуг по оперативно-диспетчерскому управлению;

- отрицательное отношение сетевых и генерирующих компаний. Распределенная генерация на территории промышленных объектов оказывает сдерживающее влияние на рост инвестиционных расходов сетевых компаний, а также снижает объем продаж электроэнергии и мощности генерирующими компаниями, владеющими региональными электростанциями. Отсюда выпадающие доходы;

- отношение системного оператора. Отношение системного оператора к строительству объектов распределенной генерации двойственное. С одной стороны, число объектов, которыми следует управлять или хотя бы наблюдать, множится, а это добавляет хлопот и затрат на персонал, программные средства и т.п. С другой стороны, распределенная генерация положительно влияет на надежность энергоснабжения, что приветствуется;

- технические проблемы, сопряженные с распространением распределенной генерации. Распределенная генерация – это зачастую новое оборудование, импортированное из-за рубежа, с новыми динамическими характеристиками и возможностями управления. Подключение источников распределенной генерации к распределительной сети увеличивает токи короткого замыкания, что может потребовать замены коммутацион-

ных аппаратов, изменения настроек защит и др. Появление распределенной генерации усложняет оперативно-диспетчерское управление, а также систему релейной защиты и автоматики, противоаварийного управления. Многие из этих функций переходят к распределительным сетям, где может не быть персонала, способного с этим справиться.

Итак, подводя итог, можно отметить, что уход многих потребителей от исключительно централизованного энергоснабжения – общемировая тенденция. Противостоять этой тенденции бессмысленно. Разумнее принять ее к сведению и попытаться найти оптимальное соотношение между централизованным производством электрической и тепловой энергии и локальными их источниками, скорее всего средними и малыми. Энергосистема будущего должна будет сочетать крупные электростанции, без которых проблематично электроснабжение крупных потребителей и обеспечение роста электропотребления, и распределенную генерацию.

В России, несмотря на рост темпов строительства объектов распределенной генерации, этот процесс не находит должного места в перспективном планировании развития системы. Еще нет осознания того вклада, который распределенная генерация может внести в общее развитие системы и ее модернизацию, и нет осмысленной государственной политики на этот счет. При разработке такой политики важнейшим положением должно стать требование проанализировать и при необходимости пересмотреть философию и технологию перспективного планирования развития системы с учетом распространения распределенной генерации, создания микросетей и внедрения технологий «умных» сетей.

Библиографический список

1. **Ряпин, И.** Развитие распределенной генерации / И. Ряпин. – 2012.
2. **Праховник, А.В.** Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения / А.В. Праховник. – 2007.

*Я.В. Ильина, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ – ЯЧЕЙКАХ

Топливные элементы (ячейки) – альтернативная энергетика.
Наряду с такими нетрадиционными источниками энергии, как солнечные

батареи, ветроэлектрические станции и т.д., все более значительное место занимают так называемые топливные ячейки.

Электростанции на топливных элементах – ячейках работают на природном газе. Такие электростанции преобразуют химическую энергию непосредственно в электричество, при этом выделяется высокое количество тепловой энергии. Электрический КПД электростанций на топливных элементах – ячейках достигает 45 – 50 %. Общий коэффициент использования топлива > 80 %.

Электростанции на топливных ячейках функционируют практически бесшумно. Шум энергетических установок с топливными элементами – ячейками настолько низок (< 60 дБ), что нет необходимости в какой-либо дополнительной звуковой коррекции. У энергетических комплексов с топливными ячейками полностью отсутствуют вибрации.

Теплоэлектростанции на топливных элементах – ячейках оптимальны для производства электричества и тепла в городских условиях, в закрытых помещениях, в сельской местности. На базе энергоустановок с топливными элементами – ячейками осуществима утилизация тепла, потенциально возможно производство холода – тригенерация.

В качестве топлива, в топливных ячейках можно использовать практически любые природные газы.

Теплоэлектростанции на топливных элементах – ячейках, преимущества и особенности. У электростанции на топливных элементах – ячейках, среди всех существующих типов электростанций на углеводородном топливе – самые низкие выбросы – эмиссии:

- NOx – меньше 0,5 ppm;
- CO₂ – на 50 % меньше, чем в газовых электростанциях с обычными технологиями;
- высокий электрический КПД электростанции на топливных ячейках;
- низкие операционные расходы;
- простота использования – отсутствие операторов;
- высокая надежность;
- воздушное охлаждение энергоблока на топливных ячейках;
- стабильное напряжение;
- комбинированное производство электроэнергии и тепла;
- незначительные объемы монтажных и пусковых работ;
- небольшие объемы сервисных работ;
- удобство обслуживания;
- возможность перевозки различными видами транспорта.

Теплоэлектростанции на топливных ячейках – недостатки:

- стоимость – цена 1 кВт установленной электрической мощности установки на топливных элементах – ячейках начинается от 4000 \$;

- время выхода на рабочий режим 18 часов;
- электростанции на топливных элементах – ячейках имеют относительно большой вес.

Электростанции на топливных элементах – ячейках – основные компоненты. Основными компонентами системы на топливных ячейках являются:

- SOFC – модуль твердых оксидных топливных элементов;
- системы управления;
- система кондиционирования энергоблока;
- конвертор для преобразования постоянного тока в переменный ток;
- теплообменник.

Библиографический список

1. http://manbw.ru/analytics/power_stations_%20fuel_cells_power_plants.html.

*М.А. Созинов, студ.; рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, Иваново)*

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЛИНИЙ И ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА. ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ

В 1880 г. Томас Эдисон патентует системы производства и распределения электроэнергии. В качестве линий передачи была выбрана система из трех проводов – нулевой и ± 110 вольт. Далее в 1882 г. Эдисон запускает первую электростанцию в Лондоне, а несколькими месяцами позже – в Манхэттене. К 1887 году в США было построено более сотни электростанций постоянного тока, работавших на данной трехпроводной системе.

Новый этап развития линий работающих на постоянном токе начался с изобретения ртутных выпрямителей.

В передаче энергии ртутные вентили начали использоваться с 1920 г. Начиная с 1932 г. Джeneral Электрик использовала ртутные вентили на линии передачи постоянного тока (ППТ) напряжением 12 кВ, которая также использовалась, чтобы преобразовывать напряжение генераторов с частотой 40 Гц в напряжение нагрузки с частотой 60 Гц, в Mechanicville, Нью-Йорк.

В 1941 была разработана 115-километровая подземная кабельная линия, мощностью 60 МВт, напряжением ± 200 кВ, для города Берлина, использовавшая ртутные вентили (Проект «Эльба»), но вследствие разгрома Германии во Второй мировой войне проект не был завершен.

Компанией ASEA в 1954 г. ввела первую в мире ППТ в Швеции между островом Готланд и Скандинавским полуостровом. Её мощность составила 30 МВт при напряжении 150 кВ и протяженностью 96 км [1].

Ртутные вентили были распространены вплоть до 1972 года, когда были изобретены первые тиристорные преобразователи. Первым объектом, работающим на тиристорных преобразователях стала построенная в 1972 г. ВПТ в Канаде EelRiver, мощность которой составила 320 МВт [1].

К 1987 г. в мире находилось в эксплуатации 40 передач и вставок постоянного тока общей мощностью около 28 ГВт [1]. К 2009 г. (по данным Cigre) в мире действовало около 100 объектов постоянного тока общей мощностью около 70 ГВт [2].

Самой мощной на сегодняшний день является ППТ построенная в Бразилии и предназначенная для передачи мощности от ГЭС Итайпу на р. Парана в район г. Сан-Пауло. Эта передача состоит из двух цепей мощностью по 3150 МВт и длиной около 800 км каждая [2]. Самый длинный кабель постоянного тока проложен в Новой Зеландии протяженностью 612 км и мощностью 1240 МВт [2].

Самая мощная вставка постоянного тока установлена в России в г. Выборг для связи энергосистем России и Финляндии. Она содержит 4 комплектных высоковольтных преобразовательных устройства (КВПУ), каждый мощностью 335 МВт (суммарная мощность свыше 1400 МВт) [2].

Последнее время в тиристорных преобразователях вместо преобразователей тока все чаще используют преобразователи напряжения (ПН). По мере снижения стоимости на них находится все более широкий круг их применения [3]. На сегодняшний день технологию на использовании ПН предлагают компании ABB (HVDClight) и Siemens (HVDCplus). Выбор конкретного варианта для отдельной схемы основывается на экономических и других факторах.

Применение ППТ в условиях России имеет следующие предпосылки:

- большая протяженность территории страны;
- неравномерное распределение энергоресурсов и промышленности (наибольшие запасы минерального топлива и гидроресурсов – в Сибири, наибольшее сосредоточение населения и промышленности – в европейской части);
- формирование ЕНЭС в виде крупных региональных объединений, связанных между собой сравнительно слабыми связями.

В перспективных планах роль ППТ в ЕНЭС связана с необходимостью транспорта электроэнергии из энергоизбыточных регионов Сибири в центр, на юг и Дальний Восток. Это объясняется разностью в ценах электроэнергии, произведенной в центре и в Сибири и необходимостью

резерва мощности для обеспечения надежного энергоснабжения центра, целенаправленного управления режимами ЕНЭС.

Из-за особого расположения России на Евро-Азиатском континенте отечественная энергосистема может стать не только крупнейшим экспортером электроэнергии, но и посредником в обмене энергопотоками для энергосистем сопредельных государств, что потребует значительного улучшения управляемости ЕНЭС.

Важными причинами использования ППТ для связи России с энергосистемами других государств являются:

- сложности объединения на переменном токе с крупными зарубежными энергосистемами и из-за различий в системах регулирования частоты и мощности, других системах автоматики, различий в системах оперативного управления и нормативной базе и др.;

- большие расстояния, затрудняющие создание синхронных связей с энергосистемами стран, расположенных к югу от границ с Россией (энергообъединение среднеазиатских республик бывшего СССР, энергосистемы Китая, Кореи, Ирана, Турции и других стран);

- наличие широких водных преград (при связи, например, с энергосистемами Японии и Турции).

Библиографический список

1. **Hauge, O.** Compendium of HVDC schemes throughout the world / O. Hauge. – Cigre, 1987.
2. **Сборник** действующих объектов постоянного тока на 2009 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: cigre, url: <http://b4.cigre.org/Publications/Other-Documents>.
3. **Суд, В.К.** HVDCandFACTScontrollers: применения статических преобразователей в энергетических системах; пер. с англ. / В.К. Суд. – НП «НИИА», 2009. – 344 с.
4. **Рыжов, Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
5. **Передача** постоянного тока. Перспективы применения // Новости электротехники. – 2007. – № 4.

*А.А. Шутенко, студ.; рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СЛЕД В ИСТОРИИ, КАК СМЫСЛ В ЖИЗНИ...

«То, что мы знаем, – ограничено, а то, чего мы не знаем, – бесконечно». Эти слова стали лозунгом жизни великого человека Пьера-Симона Лапласа.

Французский астроном, математик и физик Пьер Симон де Лаплас родился в крестьянской семье в нормандском департаменте Кальвадос. Учился в школе бенедиктинцев, после окончания которой, вышел убежденным атеистом. Впоследствии граф и маркиз, Лаплас стыдился своего незнатного происхождения, поэтому о его детских и юношеских годах известно очень немного.

Состоятельные соседи помогли способному мальчику поступить в университет города Канн. Посланная им в Турин и напечатанная там статья «*Sur le calcul intégral aux différences infiniment petites et aux différences finies*» в 1766 году обратил на себя внимание учёных, и Лаплас был приглашён в Париж. В этой статье ученый описывает уравнения, которые в дальнейшем становятся важнейшим шагом на пути развития механики и физической астрономии. Даламбер сразу оценил юношу и помог устроиться преподавателем математики в Военную академию. Можно дополнить, что статья была камнем преткновения большого конфликта между учеными физиками. В частности, Лагранжем была ранее послана статья о максимумах и минимумах функций, эта статья блистала до тех пор пока Лаплас не затмил ее своими изложенными открытиями.



Уладив житейские дела, Лаплас сразу приступил к штурму «главной проблемы небесной механики»: исследованию устойчивости Солнечной системы. Одновременно он публиковал важные работы по теории определителей, теории вероятностей, математической физике.

В 1772 году Лаплас сделал попытку поступить в Парижскую академию наук, но безуспешно. Даламбер попытался устроить своего ученика в Берлинскую академию и написал письмо ее президенту Лагранжу. Но Лагранж вежливо отказал. Взаимоотношения между учеными не были гладкими, конфликты возникали на фоне конкуренции.

Помимо трудов по физике и астрономии, Лаплас добился значительных успехов в математике. Студенты знают его прежде всего по «Преобразования Лапласа», которые используются при решении дифференциальных уравнений в расчетах переходных процессов в электрических цепях и лежат в основе операторного метода

Люди, знавшие Лапласа, отзываются о нем, как о человеке с большим сердцем, которое полно доброжелательности, искренности, взаимопонимания. Именно любовь к людям подвигла ученого на открытия в различных областях науки, он возвысил человечество, стал примером для подражания. Человечество увековечило его имя в бесконечном пото-

ке истории. Его имя внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни. Умер деятель науки 5 марта 1827 года в собственном имении под Парижем, на 78-м году жизни. И после себя оставил след, след, который обошелся ему ценою всей жизни...

Библиографический список

1. **Физическая** энциклопедия. – Т.2. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 1980.
2. [www.http://ru.wikipedia.org/Pierre-Simon de Laplace](http://ru.wikipedia.org/Pierre-Simon de Laplace).

Д.А. Судакова, студ.;
рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

«ВЕЛИКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОЭМА» ЖОЗЕФА ФУРЬЕ



Фурье Жан Батист Жозеф, французский математик и физик, иностранный почетный член Петербургской АН (1829 г). Жозеф Фурье родился 21 февраля 1768 г в г. Осере. Остался круглым сиротой в восьмилетнем возрасте. В своей первой школе Фурье показывал успехи в изучении французского и латыни. В возрасте 12 лет Фурье устроили в военную школу при бенедиктинском монастыре. К 13 годам Жозеф заинтересовался математикой, а в возрасте 14 лет он освоил шеститомный «Курс математики» Безу. В 17-летнем возрасте он грезил военной карьерой. Несмотря на поддержку школьных учителей Фурье получил отказ, связанный с его незнатным происхождением. Жан Батист проходил обучение с удивительной легкостью, быстротой, а окончив школу, остался там преподавателем. В 1796 году возглавил кафедру математического анализа в знаменитой Политехнической школе, причем его лекции отличались отточенностью и изяществом стиля.

В 1798 году Фурье принял участие в Египетской экспедиции Наполеона. Вернувшись, он занялся административной деятельностью и одновременно – теорией распространения тепла в твердом теле.

Трудолюбие и методичность воспевались не раз и не два. Вот и Жан Фурье – аккуратно выведя дифференциальное уравнение теплопро-

водности, принялся искать его решение методом разделения переменных, задавая различные граничные условия. Фурье стал представлять математические функции тригонометрическими рядами. Рядами, состоящими из гармонических составляющих. Рядами Фурье – так назовут их потом.

Был ли Жан Фурье первооткрывателем? Был ли он оригинален в идее замены функции тригонометрическим рядом? Теоретики науки сообщают, что формулы для вычисления коэффициентов ряда были известны великому Леонарду Эйлеру. Эйлер дал их вывод путем почленно-го интегрирования в 1777 году. Но он использовал их спорадически, от случая к случаю, а неуклонно нацеленный Фурье сделал их употребление системой. «Великой математической поэмой» назвал труд Фурье лорд Кельвин.

В 1789 году в Париже в Королевской Академии Наук Фурье представил работу о численном решении уравнений любой степени. В своих лекциях в 1796 году он изложил теорему о числе действительных корней алгебраического уравнения, лежащих между данными границами, названную впоследствии его именем.

В 1807 году он подготовил доклад «О распространении тепла в твёрдом теле», который представил того же года в Париже.

Свои методы (ряды и интегралы Фурье) он использовал в теории распространения тепла. Но вскоре они стали исключительно мощным инструментом математического исследования самых разных задач – особенно там, где есть волны и колебания. А этот круг чрезвычайно широк – астрономия, акустика, теория приливов, радиотехника, и др. Но для нас самое главное электротехника, ведь с помощью рядов и интегралов Фурье изучают периодические процессы с несинусоидальными величинами.

В 1817 году Фурье был избран членом Академии наук. В 1823 г. открыл термоэлектрический эффект, показал, что он обладает свойством суперпозиции. Заслуги его на поприще математических наук сосредоточиваются главным образом на теории решения численных уравнений, на теории распространения тепла и на разложении в ряды тригонометрических функций.

Последние годы Жана Фурье, избранного постоянным секретарем Парижской академии наук, прошли в бесконечных выступлениях. Умер Фурье на 63-м году жизни 16 мая 1830 г. не исключено, что от болезни сердца. Имя Жана Фурье внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом ярусе Эйфелевой башни.

*А.Ю. Докучаев, Ю.А. Пирожкова, студенты;
рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент*

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Период развития электротехники конца XIX века получил броское название «Война токов». Основная конкуренция шла между двумя типами систем генерации, электроснабжения и электропотребления – системы на постоянном и переменном токах. Этот период развития электротехники принято связывать с именами известных американских изобретателей и предпринимателей: Томасом Эдисоном (системы на постоянном токе) с одной стороны и Джорджем Вестингаузом и Николой Тесла (системы на переменном токе) с другой. Важнейшим аргументом в пользу систем переменного тока явились разработанная и внедренные Михаилом Доливо-Добровольским трехфазная система переменного тока. Эта система, включающая трехфазные линии электропередачи, генераторы, трансформаторы и двигатели является основой современной электроэнергетики. Концепция построения электрических систем постоянного тока в XX веке массового развития не получила [1].

В последнее время в мире проявляют повышенный интерес к сооружению крупных энергосистем высоковольтных ЛЭП постоянного тока (ППТ). Это связано с растущей потребностью в увеличении количества пропускной способности линий электропередач и увеличение выработки возобновляемого источника энергии. Высоковольтная линия электропередач постоянного тока используется для передачи больших электрических мощностей по сравнению с системами переменного тока. При передаче электроэнергии на большие расстояния устройства системы ППТ менее дороги и имеют более низкие электрические потери, за исключением преобразовательного оборудование и системы защиты.

Во второй половине XX века на нескольких экспериментальных и промышленных линиях электропередачи постоянного тока был получен бесценный опыт, который послужили прототипами для будущих проектов. Например: Дессау – Берлин длина 115 км мощность 60 МВт, Кашира – Москва длина 100 км мощность 30 МВт. Высоковольтные линии постоянного тока наиболее актуальны для стран, имеющих большие расстояния между местами потребления и производства электроэнергии (между промышленными центрами и угольными бассейнами, большими реками), а именно для Бразилии, России, Индии и Китая, а также для Южной Африки. В Китае, в рамках программы строительства сверх-

высоковольтных линий постоянного тока ± 800 кВ, введена в эксплуатацию ЛЭП мощностью 7200 МВт и длиной около 2000 км от тибетской ГЭС Ксяньгиаба до Шанхая. Возможно, что одна из таких линий будет иметь начало в районе Иркутска.

Однако есть и печальный опыт строительства крупных энергосистем – это начатая в 1978 году высоковольтная линия постоянного тока Экибастуз – Центр – незаконченная линия электропередачи между Экибастузом в Казахстане и Тамбовом в России. По плану данная линия была бы самой длинной в мире по протяженности (2414 км) и крупнейшей по передаче максимальной мощности (до 6000 МВт). Для передачи электроэнергии напряжением 1500 кВ планировалось построить около 4000 опор высотой 41 м. В ходе строительства было построено несколько сотен километров этой линии. С развалом СССР строительство было прекращено, а часть линии разворована. В результате было украдено проводов общим весом 1443 тонны, разрушено несколько десятков опор, а убытки составили ошеломляющую сумму – 4 триллиона 695 миллиардов рублей. До сих пор судьба оставшейся линии Экибастуз – Центр, считавшейся в свое время «стройкой века», остается не решенной [2, 3].

Энергосистемы ППТ в Западной Европе приведены на рис. 1. Сплошной линией отмечены существующие линии, пунктиром – проектируемые. Большинство из линий ППТ передают электроэнергию от возобновляемых источников (вода и ветер).



Рис. 1. Энергосистемы постоянного тока в Западной Европе

Первоначально преобразователи на сверхвысоковольтных подстанциях строились на базе ртутных вентилей. Существенный скачок произошел после разработки высоковольтных тиристоров и, несколько позже IGBT транзисторов, позволивших создавать более эффективные статические преобразователи для высоковольтных линий. Тем не менее, стоимость преобразовательных подстанций на постоянном токе существенно превосходит стоимость подстанций на переменном токе.

Преимущество линий ППТ – способность передавать большее количество энергии на длинные расстояния с меньшими капитальными затратами и меньшими потерями, чем на переменном токе. В зависимости от уровня напряжения и схемы, потери будут составлять приблизительно 3 % на 1000 км. Передача на постоянном токе высокого напряжения позволяет эффективно использовать источники энергии, удаленные от энергоузлов нагрузки.

Недостатками ЛЭППТ являются:

- оборудование для преобразования постоянного тока из-за высоких передаваемых мощностей, к сожалению, на порядок дороже, чем для переменного тока и конструктивно сложны;

- также одним из важных недостатков схемы ППТ является отсутствие возможности отвлечения от нее линий на малые объекты, расположенные в непосредственной близости от высоковольтной линии электропередач постоянного тока из-за неимения в настоящее время необходимого для этого оборудования.

Из-за особенностей энергосистемы ППТ предъявляются повышенные требования к защите. Во время коротких замыканий токи повышаются мгновенно, допустимое время срабатывания выключателей равно нескольким миллисекундам. В тоже время защита не должна реагировать на возникающие в линии помехи [4].

При создании энергосистемы ППТ необходимо будет принять во внимание строгие требования безопасности и надежности, поскольку энергосистема ППТ будет наложена сеткой на основную энергосистему переменного тока, на которую может быть оказано значительное воздействие, при этом энергосистема ППТ не должна разрушаться. В основной план энергосистемы ППТ должно быть включено резервирование и создание избыточной мощности, с целью исключения коротких замыканий линий, что обеспечит работу системы в случае всех расчетных аварийных нарушений. Одной важной частью работы безопасности и надежности является распределительное устройство, которое напоминает распределительное устройство переменного тока, как видно на рис. 2.

Самой очевидно новой составляющей, необходимой в энергосистеме ППТ, является быстродействующий выключатель линии ППТ для на-

пряжения постоянного тока, который должен быть намного быстрее, чем какой-либо уже существующий механический выключатель постоянного тока. Полупроводниковые ключи, используемые в преобразователях частоты VSC, могут прервать соединение за несколько микросекунд, таким образом, эта проблема может быть решена.

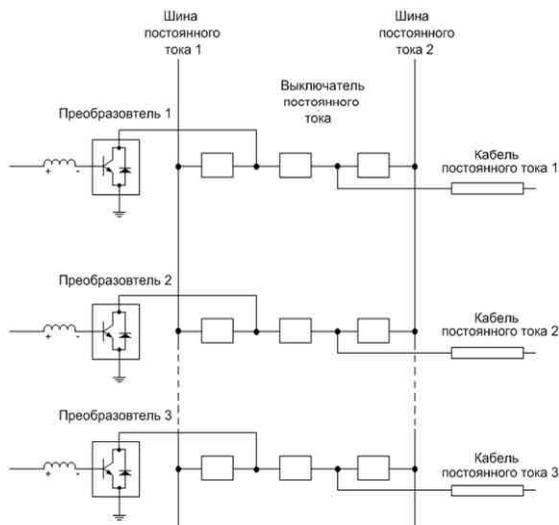


Рис. 2. Распределенное устройство подстанции постоянного тока

Компания АВВ создала гибридный образец выключателя постоянного тока, частично электронный и частично механический, и проверил его испытание при напряжении до 80 кВ. Утверждается, что выключатель может быть широко использован для всех существующих напряжений постоянного тока и теперь коммерчески доступен.

Существуют гибридные линии электропередачи, они позволяют улучшить устойчивость, надежность и повысить пропускную способность линий переменного напряжения путем добавления к ним линий постоянного тока и вставок.

Примером гибридной линии служит концепция Supernode. Она предусматривает прокладку параллельно с существующей линией переменного тока «дублирующей» линии постоянного тока, которая позволяет, например, повысить ее живучесть при возникновении различных аварийных ситуаций, например обрыва или короткого замыкания одной из фаз.

Существуют также предложения по «переформатированию» существующих трехпроводных линий на передачу постоянного тока, при этом

«лишний» третий провод периодически подключается то к одному, то к другому полюсу напряжения. Это позволяет увеличить передаваемую мощность до двух и более раз без изменения конструкции линии [5].

Развитие биполярных транзисторов с изолированным затвором и запираемых тиристоров сделало малые системы ППТ экономичнее. Они могут быть установлены в существующих энергосистемах переменного тока для стабилизации мощности без увеличения тока короткого замыкания, как в случае установки дополнительной линии электропередачи переменного тока.

Однако, стоимость проекта ППТ очень высока, поэтому ведется активная работа по снижению ее стоимости.

Таким образом, передачу электроэнергии на дальние расстояния и питание современных электроприводов более выгодно осуществлять на постоянном токе. Более того, для тех технологий, которым ранее переменный ток был единственно возможным (например, для уличного освещения лампами высокого давления), постоянное напряжение также становится более предпочтительным.

Однако есть сферы, в которых преимущества постоянного тока вовсе не являются такими уж очевидными. По-прежнему в воздушных линиях средней (до 500 км) дальности переменный ток экономически более выгоден ввиду существенно меньшей стоимости трансформаторных подстанций.

Необходимо учитывать, что при разработке любого крупного проекта в его технико-экономическое обоснование следует включать сравнение возможных вариантов по экономическому критерию, за который в последнее время обоснованно принимается общую стоимость владения. Очевидно, что если электропередачам переменного тока средней дальности удастся сохраниться в общем «окружении» сетей постоянного тока, то потребуются ввод дополнительных инверторов и выпрямителей на входе и выходе таких линий, что существенно увеличит их стоимость. В тоже время, необходимо отметить, что замена высоковольтных линий переменного тока средней дальности на линии постоянного тока требует разработки преобразователей большой мощности, отсутствующих в настоящее время.

Описанные процессы могут привести к концу XXI века к переходу на постоянное напряжение во многих сферах, в которых это более экономично.

Библиографический список

1. **ОАО «ФСК ЕЭС»**. История отрасли [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/>.
2. **Рокотян, С.С.** Передача электроэнергии на дальние расстояния / С.С. Рокотян. – М.: Энергия, 1978.
3. **Грабеж века на стройке века** // Российские вести. –1997. – 9 октября.
4. **SIGRE** // HVDC Grid Feasibility Study. – № 533. – Working Group B4.52. – April 2013.
5. **ELECTRA** // Technical brochure. – HVDC Grid Feasibility Study. –№ 267. – Working Group B4.52. –April 2013.

С.А. Пещерова, студ.; рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент

CIGRE : ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения – сокращенно СИГРЭ (аббревиатура французского наименования «Conseil International des Grands Réseaux Électriques» – CIGRE) – крупнейшая, постоянно действующая, международная, неправительственная и некоммерческая организация в области электроэнергетики, созданная в 1921 г. во Франции. Штаб-квартира расположена в Париже. Основная цель деятельности СИГРЭ – координация развития электроэнергетики во всем мире, обмен информацией между странами в областях генерирования электроэнергии и ее передачи.

Необходимость в создании такой организации возникла вскоре после окончания Первой мировой войны. Многие довоенные электростанции требовали ремонта и модернизации, ощущался дефицит генерирующих мощностей. Эффективным путем решения этой проблемы стало объединение в энергосистемы ранее разрозненных локальных систем.

В ноябре 1921 состоялась первая конференция СИГРЭ, дата ее считается днем «рождения» СИГРЭ. Её подготовкой занимался Jean Tribot Laspiere – Генеральный секретарь французского объединения Union des Syndicats de l'Electricite, который считается основателем СИГРЭ. В конференции приняли участие 12 стран, представлено 59 докладов, дискуссии по которым продолжались в течение 6 дней.

Первые годы своего существования СИГРЭ не была полностью самостоятельна и действовала под эгидой объединения Union des Syndicats de l'Electricite, но на сессии 1927 года стала самостоятельной Международной ассоциацией с собственным статусом.

На сессии 1931 г. был утвержден первый Устав СИГРЭ, и выпущен первый номер журнала *Electra*. В настоящее время *Electra* – двуязычный журнал СИГРЭ, выпускаемый раз в два месяца для профессионалов – электроэнергетиков, он предоставляет информацию о ходе и результатах технической деятельности СИГРЭ, о последних работах и исследованиях, проводимых комитетами, об организованных мероприятиях Ассоциации.

На время Второй мировой войны деятельность СИГРЭ была приостановлена. Однако огромные трудности военных лет не ослабили интерес многих стран к данной организации. Первая послевоенная сессия СИГРЭ состоялась в Париже в 1946 г., с этого момента работа организации не прекращалась. Регулярно один раз в два года проводятся Сессии, на которых обсуждаются доклады по всем направлениям деятельности в организации. Доклады подготавливаются и представляются Националь-

ными комитетами в соответствии с намеченными заранее предпочтительными темами, заранее публикуются и поэтому на сессии не зачитываются, а только обсуждаются.

Наша страна присоединилась к работе в СИГРЭ в 1923 году и является старейшим членом организации. Российский национальный комитет занимает одно из ведущих мест в СИГРЭ, как по численности, так и по уровню исследований в области электроэнергетики. Российские ученые активно участвуют в работе исследовательских комитетов и рабочих групп, симпозиумов и коллоквиумов СИГРЭ. Это обеспечивает возможность получения оперативной научно-технической информации о достижениях в области электроэнергетики большинства стран мира, которая широко используется в исследованиях и разработке нормативных документов, в проектной и эксплуатационной практике. Большой вклад в работу СИГРЭ внесли выдающиеся электроэнергетики нашей страны: Б.П. Лебедев, М.П. Костенко, И.А. Глебов, М.В. Костенко, В.А. Веников, Н.Н. Тиходеев, Г.Н. Александров и другие. Основной целью Российского национального комитета является представление интересов России в СИГРЭ и содействие членам РНК СИГРЭ в развитии обмена техническими знаниями и взаимодействия с зарубежными коллегами. Органами управления РНК СИГРЭ являются: Общее собрание (высший орган управления) и Президиум (постоянно действующий коллегиальный орган управления). Председатель РНК СИГРЭ избирается Ассамблеей сроком на четыре года и осуществляет общее руководство деятельностью комитета. С мая 2009 эту должность занимает Аюев Б.И. – доктор технических наук, председатель Правления ОАО «СО ЕЭС». Почетный председатель РНК СИГРЭ избирается Ассамблеей. Звание почетного председателя РНК СИГРЭ является высшим знаком признательности и присваивается пожизненно за выдающиеся заслуги и многолетнюю плодотворную работу в РНК СИГРЭ. В 2009 г. на данную должность был избран Дьяков А.Ф., член-корреспондент Российской академии наук.

В июне 2012 года на заседании Президиума РНК СИГРЭ было принято решение о создании Молодежной секции РНК СИГРЭ. Это специализированная программа для студентов, бакалавров и магистрантов российских технических вузов, обучающихся по электроэнергетическим специальностям, а также аспирантов и молодых ученых, занимающихся научными исследованиями. Основной целью Молодежной секции является воспитание и подготовка нового поколения российских энергетиков, обладающих международной конкурентоспособностью, способных осуществить технологический инновационный прорыв в российской электроэнергетике. Мероприятия программы проводятся на базе ведущих российских энергетических вузов: Самарский государственный техниче-

ский университет, Уральский Федеральный университет, Южно-Российский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, НИУ «Московский энергетический институт», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Казанский государственный энергетический университет, Ивановский государственный энергетический университет. В рамках программы на регулярной основе предоставляются гранты на проведение научных исследований, публикуются лучшие работы по электроэнергетической тематике, проводятся молодежные конференции, выставки, конкурсы, викторины, олимпиады. Победители получают денежные призы, награды, приглашаются в работе в ИК СИГРЭ, зачисляются в кадровый резерв крупных компаний российской электроэнергетики. Выявление, продвижение, поддержка образовательной активности молодежи и ее достижений в научно-техническом развитии и творчестве дает возможность молодым людям проявить себя, реализовать свой потенциал, получить признание в России.

В Ивановском государственном энергетическом университете также действует Молодежная секция РНК СИГРЭ, членами которой являются более 70 человек: преподавателей, студентов, аспирантов, магистрантов. В рамках нашей организации в ИГЭУ были проведены Всероссийская студенческая олимпиада по теоретической и общей электротехнике, конкурс переводчиков научно-технической литературы «Littera-2013», конкурс докладов по тематике СИГРЭ в рамках восьмой международной конференции «Энергия -2013», которые охватили более 500 студентов и молодых ученых.

На сегодняшний день СИГРЭ является одной из наиболее авторитетных научно-технических ассоциаций, которая объединяет ученых и специалистов-энергетиков всего мира и оказывает сильное влияние на формирование стратегии развития отрасли многих стран. Членами СИГРЭ являются более 1000 организаций и свыше 6000 экспертов. Одной из ключевых задач является сохранение многолетних традиций СИГРЭ и ее огромного научно-технического потенциала, удержание за собой роли ведущей международной организацией по всем проблемам, относящимся к электроэнергетике.

Библиографический список

1. **Ишкин, В.Х.** Международный совет по большим электрическим системам: История деятельности СИГРЭ в 1921 – 2001 гг. / В.Х. Ишкин, Л.Г. Мамиконянц.– М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 136 с.

2. **The History** of CIRGE Conseil International des Grands Réseaux Électriques [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.calameo.com/read/0010714518803540076d5>.

СЕКЦИЯ 18

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Председатель – к.т.н., доцент Лапшин В.М.

Секретарь – ассистент Глотова Н.В.

*А.С. Страхов, студ.; рук. О.Н. Калачева, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ НЕЙТРАЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

В [1] предлагалось использовать математическую компьютерную модель, изображённую на рис. 1, для исследования режимов заземления нейтралей.

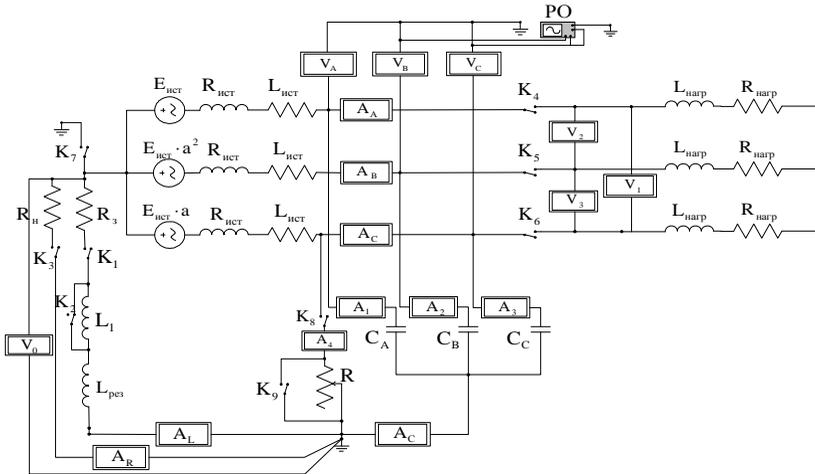


Рис. 1. Схема компьютерной модели

Параметры модели были настроены согласно примеру, приведённому в [1], в соответствии с сетью низшего напряжения (НН) понижитель-

ной подстанции с питающими трансформаторами типа Т-16000/110/10, работающими с коэффициентом загрузки 0,6, с восьмью отходящими кабельными линиями от каждой секции шин НН длиной 300 м и сечением 70 мм².

На модели исследовались следующие способы заземления нейтрали:

- 1Р – незаземлённая нейтраль сети;
- 1Р (а) – нормальный режим;
- 1Р (б) – ёмкостная несимметрия ($C_C \approx 1,05C$);
- 1Р (в) – замыкание на землю фазы С;
- 2Р – компенсированная нейтраль с резонансной настройкой компенсации ёмкостных токов замыкания на землю;
- 3Р – режим перекомпенсации;
- 4Р – режим резистивно-заземлённой нейтрали.

Результаты исследования на компьютерной модели приведены в табл. 1 и 2. Значения напряжений приведены в относительных единицах по отношению к $U_{\phi \text{ ном}}$.

Таблица 1. Исследование режимов сети с изолированной нейтралью

Режим	$U_{\text{н}}$ о.е.	$I_{\text{Сзам}}$ А	R , Ом	$I_{\text{СА}}$, А	$I_{\text{СВ}}$, А	$I_{\text{СС}}$, А	$U_{\text{фА}}$ о.е.	$U_{\text{фВ}}$ о.е.	$U_{\text{фС}}$ о.е.	$U_{\text{АВ}}$ о.е.	$U_{\text{ВС}}$ о.е.	$U_{\text{СА}}$ о.е.
1Р (а)	0	–	–	1,9	1,9	1,9	1	1	1	1,73	1,73	1,73
1Р (б)	0,09	–	–	1,91	1,91	1,96	1,01	1,01	0,98	1,73	1,73	1,73
1Р (в)	1	5,69	0	3,28	3,28	0,18	1,73	1,73	0	1,73	1,73	1,73
	0,98	5,58	200	3,05	3,42	0,37	1,61	1,8	0,19	1,73	1,73	1,73
	0,96	5,45	300	2,92	3,45	0,54	1,54	1,82	0,28	1,73	1,73	1,73
	0,9	5,1	500	2,63	3,44	0,84	1,39	1,8	0,44	1,73	1,73	1,73
	0,71	4,04	1000	2,03	3,22	1,33	1,07	1,7	0,7	1,73	1,73	1,73

В ходе исследований было выявлено:

– В нормальном режиме с изолированной нейтралью ёмкостные токи каждой фазы на землю равны друг другу, напряжение каждой фазы равно 1 о.е., а напряжения между фазами – 1,73 о.е.

– В режиме ёмкостной несимметрии видны изменения ёмкостных токов линий и фазных напряжений.

– В режиме металлического замыкания на землю ($R = 0$) напряжения «здоровых» фаз увеличиваются до значения 1,73 о.е., то есть до величины линейного напряжения. Кроме того, увеличивается ёмкостный ток неповреждённых фаз. Линейные напряжения при замыкании на землю не изменяются.

Для проверки полученных значений были построены векторные диаграммы для случаев металлического замыкания и замыкания через сопротивление $R = 1000$ Ом. Они приведены на рис. 2 и 3. При сопостав-

лении результатов табл. 2 и полученных при построении векторных диаграмм видно, что они совпадают с достаточной точностью, что подтверждает правильность работы модели.

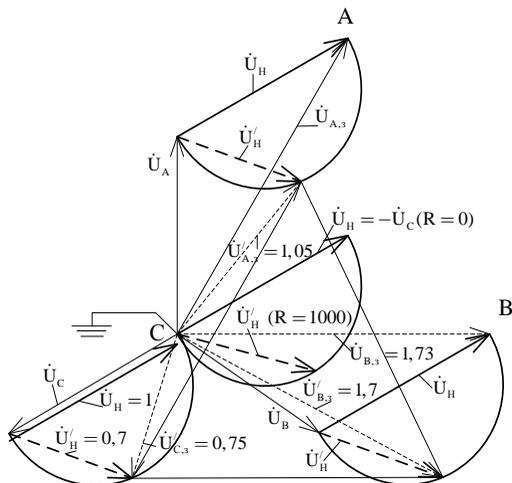


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений сети с изолированной нейтралью при металлическом замыкании на землю фазы С и замыкании через переходное сопротивление $R = 1000$ Ом: для $R \neq 0$ – обозначения величин со штрихом и линии – пунктирные; для $R = 0$ и линии – сплошные

При сопоставлении результатов табл. 1 и полученных при построении векторных диаграмм видно, что они совпадают с достаточной точностью, что подтверждает правильность работы модели.

Таблица 2. Исследование режимов сети с компенсированной нейтралью и резистивно заземленной нейтралью

Режим	U_n , о.е.	I_C , А	I_L/I_R , А	$I_{зам}$, А	$U_{\phi A}$, о.е.	$U_{\phi B}$, о.е.	$U_{\phi C}$, о.е.	U_{AB} , о.е.	U_{BC} , о.е.	U_{CA} , о.е.
2Р(ЗНЗ)	1	5,7	5,45	0,18	1,73	1,73	0,01	1,73	1,73	1,73
3Р(ЗНЗ)	1	5,7	5,26	0,43	1,73	1,73	0,01	1,73	1,73	1,73
4Р(ЗНЗ)	1	5,7	38,5	39	1,73	1,73	0	1,73	1,73	1,73

В ходе исследований было выявлено:

– При работе сети с компенсированной нейтралью с резонансной настройкой компенсации ёмкостных токов замыкания на землю величина тока замыкания на землю становится очень малой и обусловлена активной составляющей тока замыкания на землю (ЗНЗ).

– В режиме перекомпенсации компенсация тока не так выражена, как в режиме резонансной настройки дугогасящего реактора, поэтому значение тока ЗНЗ увеличивается в несколько раз.

– При резистивном заземлении нейтрали значение тока ЗНЗ резко увеличивается в зависимости от величины сопротивления, включённого в нейтраль.

В ходе проделанных исследований было показано, что данная модель даёт результаты, которые с достаточной точностью соответствуют действительности, что подтверждает возможность использования этой модели для лабораторной работы по изучению студентами режимов заземления нейтралей электрических сетей.

Библиографический список

1. **Страхов, А.С.** Разработка модели сети 6(10) кВ для исследования влияния способа заземления нейтрали на работу сети в режимах замыкания на землю / А.С. Страхов // Энергия 2012: мат-лы региональной междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 3. – Иваново, 2012. – С. 21 – 26.

2. **Электрическая часть станций и подстанций:** учеб. для вузов / А.А. Васильев [и др.]; под ред. А.А. Васильева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.

*А.М. Чижевский, студ.; рук. Ю.В. Бладыко, к.т.н., доцент
(БНТУ, г. Минск)*

РАСЧЕТ СТАТИКИ ПРОВОДОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ОТПАЕК К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ

Под воздействием механической нагрузки и температуры окружающей среды в проводах воздушных линий и распределительных устройств (РУ) возникают механические напряжения. Для каждой марки провода существует предел прочности, превышение которого вызывает необратимые изменения механических свойств провода. Напряжения в проводе не должны быть больше допустимых при трёх наиболее опасных условиях:

- при наименьшей температуре;
- при наибольшей нагрузке (с гололедом и ветром);
- при среднеэксплуатационных условиях.

Кроме того, необходимо знать монтажные режимы, габариты пролетов РУ и отпаек к электрическим аппаратам в различных климатических режимах, чтобы избежать недопустимого сближения и схлестывания фаз

как при ветровых и гололедных воздействиях, так и в динамике при коротких замыканиях. В отличие от гибких проводов воздушных линий отпайки в РУ влияют на положение провода. Расчет положения провода зависит от геометрии пролета, его конструктивных особенностей, пространственного расположения отпаяк и всех механических воздействий, включая натяжение отпаяк, их длину, изменение температуры.

Решение уравнений статики гибких проводов реализовано в компьютерных программах [1], позволяющих определить стрелы провеса и тяжение проводов и оптических кабелей под действием гололедных и ветровых нагрузок. Программы учитывают разность высот подвеса, гирлянды изоляторов, распорки, а также отпайки к электрическим аппаратам. Программы пригодны для расчета монтажных режимов при способе монтажа с одной гирляндой в пролете и различных вариантах монтажа отпаяк, а также позволяют решить обратную задачу: по известной стреле провеса определить тяжение.

Алгоритм расчета отпаяк к электрическим аппаратам. Провода отпаяк монтируются практически без натяжения, поэтому они представляются нерастяжимой нитью, для которой известно аналитическое решение задачи в общем виде [2]:

$$\bar{R} = \bar{a}_1 + \frac{1}{P} \left(\bar{a}_0 - \bar{P} \frac{\bar{a}_0 P}{P^2} \right) \operatorname{arsh} \frac{P^2 s - \bar{a}_0 P}{\sqrt{\bar{a}_0^2 P^2 - (\bar{a}_0 P)^2}} - \frac{\bar{P}}{P^2} |\bar{a}_0 - \bar{P}s|; \quad (1)$$

$$\bar{T} = \bar{a}_0 - \bar{P}s; \quad 0 \leq s \leq l_0,$$

где \bar{a}_0 , \bar{a}_1 – постоянные векторы интегрирования; \bar{T} – вектор тяжения по длине отпайки; l_0 – длина отпайки; s – длина дуги; \bar{P} – суммарный вектор сил, приложенных к единице длины провода; P , a_0 – модули векторов \bar{P} и \bar{a}_0 .

Частные решения можно получить путем нахождения по заданным граничным условиям конкретных значений постоянных векторов \bar{a}_0 и \bar{a}_1 . Граничными условиями для проводов отпаяк являются их длина, а также радиус-векторы, описывающие положение точек их крепления к электрическим аппаратам и проводам сборных шин РУ. Подставив граничные условия в (1) и преобразовав их к виду, удобному для применения метода Вегстейна, получим трансцендентные уравнения для определения постоянных векторов \bar{a}_0 и \bar{a}_1 [2]:

$$\begin{aligned} \overline{a_0} &= \overline{P} \frac{\overline{a_0 P}}{P^2} + \frac{\overline{P} \left[\overline{R_a} - \overline{R_0} - \frac{\overline{P}}{P^2} \left(a_0 - \sqrt{a_0^2 - 2\overline{a_0 P} l_0 + P^2 l_0^2} \right) \right]}{\operatorname{arsh} \frac{P^2 l_0 - \overline{a_0 P}}{\sqrt{a_0^2 P^2 - (\overline{a_0 P})^2}} + \operatorname{arsh} \frac{-\overline{a_0 P}}{\sqrt{a_0^2 P^2 - (\overline{a_0 P})^2}}}; \quad (2) \\ \overline{a_1} &= \overline{R_0} - \frac{1}{P} \left(\overline{a_0} - \overline{P} \frac{\overline{a_0 P}}{P^2} \right) \operatorname{arsh} \frac{-\overline{a_0 P}}{\sqrt{a_0^2 P^2 - (\overline{a_0 P})^2}} + \frac{\overline{P}}{P^2} a_0, \end{aligned}$$

где $\overline{R_0}$ – радиус-вектор, описывающий положение зажима отпайки; $\overline{R_a}$ – радиус-вектор, описывающий положение точки крепления отпайки к электрическому аппарату.

Вектор силы, действующий от отпайки на провод, равен

$$\overline{Q_0} = \overline{a_0}, \quad (3)$$

а усилие от отпайки на электрический аппарат определяется из (1) как

$$\overline{Q_a} = \overline{P} l_0 - \overline{a_0}. \quad (4)$$

Расчет проводов может выполняться в 12 климатических режимах. Расчет климатических нагрузок выполняется согласно ПУЭ. При задании двух исходных режимов программа выбирает более тяжелый режим климатических нагрузок, при котором усилие от проводов на опоры максимальны. В этом режиме по заданному тяжению или стреле провеса производится расчет длины гибкого провода до растяжения, которая является основой для расчета остальных режимов.

В распределительных устройствах отпайки к электрическим аппаратам монтируют практически без натяжения, отмеряя их длины «на глазок». Правильный выбор длины отпаек необходим для того, чтобы в динамике и статике в различных климатических режимах усилия от них на головки разъединителей не превышали предельно допустимых.

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты расчета по программе механического расчета MR [1] для следующих исходных данных: провод 4хПА-500, длина пролета 79,6 м, килевое расположение отпаек. Начальное тяжение 5000 даН в гололедном режиме (скорость ветра 15 м/с, толщина стенки гололеда 20 мм) снижается в расчетном режиме (скорость ветра 18 м/с без гололеда) до 2150 – 2350 даН в зависимости от длины отпайки.

Таблица 1. Результаты расчета по программе механического расчета

Длина отпайки, м	Максимальная стрела провеса провода, м	Максимальное горизонтальное отклонение провода, м	Максимальное горизонтальное отклонение отпайки, м	Усилие от отпайки на провод, даН		Усилие от отпайки на аппарат, даН	
				гор.	верт.	гор.	верт.
17,1	5,97	2,51	2,60	8	299	91	200
17,4	5,49	2,88	3,42	32	192	67	88
18,0	5,28	2,95	3,93	40	170	62	60
19,0	5,22	3,09	4,83	51	146	58	31
0	3,90	2,61	–	–	–	–	–

Последняя строчка таблицы соответствует пролету без отпаяк, видно, что их наличие увеличивает вертикальные и горизонтальные отклонения гибких шин пролета. Как видно из таблицы, короткие отпайки повышают усилия на аппараты, длинные – приводят к увеличению отклонений. Для правильного выбора длин отпаяк необходимы расчеты пролета в различных климатических режимах.

Некилевое расположение отпаяк дает несимметричное решение, зависящее не только от скорости ветра, но и его направления, т.е. отклонение отпаяк неодинаково в зависимости от направления ветра.

Последняя версия пакета программ MR № 2.20 имеет одну интегрирующую Windows-оболочку, подключающую собственно программы механического расчета, файлы исходных данных, каталоги проводов и гирлянд изоляторов. Новая оболочка, написанная в Delphi, позволяет выбрать файлы исходных данных и результатов расчета, просмотреть последние. Работу с программами упрощает встроенная помощь, диагностика исходных данных, наличие каталогов проводов и гирлянд изоляторов, а также возможность их корректировки и обновления. В пакете имеются контрольные примеры расчета, инструкция, методика,

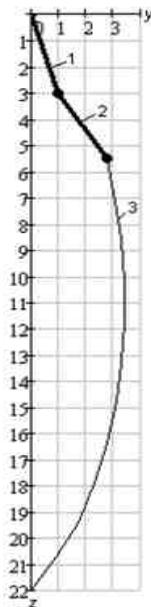


Рис. 1. Положение проводов в плоскости, перпендикулярной пролету (провода 4хПА-500 при длине пролета 79,6 м и скорости ветра 18 м/с): 1 – натяжные гирлянды изоляторов; 2 – провода пролета; 3 – отпайка к электрическому аппарату

аннотация, рисунок, поясняющий геометрию пролета. Программа учитывает варианты расположения натяжных и подвесных гирлянд изоляторов, причем расчет отклонения подвесных гирлянд изоляторов ведется с учетом влияния смежных пролетов.

Точный расчет статики гибких проводов РУ необходим не только в механическом расчете, но и для нахождения начального положения проводов в определении их электродинамической стойкости при коротких замыканиях и других воздействиях.

Библиографический список

1. **Стрелюк, М.И.** Программа механического расчета гибкой ошиновки РУ в различных режимах климатических воздействий / М.И. Стрелюк, Ю.В. Бладыко, И.И. Сергей. Инв. № ГосФАП – П007594, инв. № РФАП БССР-00143. – Минск, 1984. – 12 с.

2. **Стрелюк, М.И.** Расчет статики гибкой ошиновки ОРУ с ответвлениями к электрическим аппаратам в различных режимах климатических воздействий / М.И. Стрелюк, Ю.В. Бладыко, И.И. Сергей // Научные и прикладные проблемы энергетики: межвед. сб. – Минск: Выш. школа, 1984. – Вып. 11. – С. 26 – 32.

*А.С. Страхов, студ.,
Е.М. Новосёлов, С.Н. Литвинов, инженеры;
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОКОРРЕКЦИИ ВРЕМЕНИ ЗАПИСИ СИГНАЛА

В настоящее время на объектах электроэнергетики находят широкое применение микропроцессорные устройства, которые позволяют производить спектральный анализ сигналов (токов, напряжений, магнитных полей и т.п.), основанный на алгоритмах быстрого преобразования Фурье. Обычно точное определение значений частот гармонических составляющих осуществляется путем увеличения времени записи сигнала, которое может достигать до нескольких минут для низкочастотных составляющих спектра. Для обеспечения необходимой точности измерения требуется значительное время записи сигнала, вплоть до нескольких минут. За это время может произойти смещение датчика, изменение нагрузки и ряд других явлений, приводящих к потере точности измерения. Поэтому потребовался способ уменьшения времени записи сигнала при определении частот гармонических составляющих, который бы не приводил к потере точности.

Предлагается вместо уменьшения шага по частоте подобрать время записи таким образом, чтобы частота искомой гармоники точно совпала с границей отсчета.

Для изучения данного вопроса рассмотрим следующий пример. Имеется периодический сигнал $A(t)$, определяемый следующим выражением

$$A(t) = 5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 100),$$

частота дискретизации составляет $F_d = 10$ кГц.

Результатом быстрого преобразования Фурье сигнала $A(t)$ является спектральная функция $S(t)$ следующего вида [4]:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где ω – частота; C_k – коэффициент ряда Фурье.

По сути, спектральная функция представляет собой ряд комплексных чисел. Чтобы получить амплитудный спектр сигнала $A(t)$, необходимо совершить дополнительное преобразование. Амплитуда любой гармоники A_k связана с составляющей спектральной функции S_k следующим соотношением

$$A_k = \frac{2}{N_{OT}} \cdot \sqrt{(\operatorname{Re}(S_k))^2 + (\operatorname{Im}(S_k))^2}, \quad (2)$$

где N_{OT} – число отсчетов.

Изучим влияние времени записи на амплитудные спектры (далее просто спектры) сигнала $A(t)$. Рассмотрим следующие ситуации:

1. время записи сигнала $T_{зан.1} = 1,005$ с.
2. время записи сигнала $T_{зан.2} = 1$ с.

На рис. 1, а – б N – номер отсчета, соответствующий гармонике с максимальной амплитудой, $N - 1$ и $N + 1$ – номера отсчетов (номера гармоник), расположенных слева и справа от гармоники с максимальной амплитудой, A_N, A_{N-1}, A_{N+1} – амплитуды гармоник, соответствующие указанным отсчетам.

Проанализируем изменения спектра сигнала $A(t)$ в зависимости от времени записи.

Исходный сигнал $A(t)$ имеет всего одну гармонику с частотой 100 Гц, однако в спектре, который был получен при времени записи сигнала $T_{зан.1}$ (см. рис. 1, а), присутствует целый ряд ярко выраженных гармонических составляющих. Самым интересным является то, что наибо-

лее сильно выраженная гармоника имеет частоту 100,5 Гц и амплитуду $A_N = 3,3$, что никак не соответствует параметрам заданного сигнала (амплитуда заданного сигнала равна 5). Отклонение частоты сигнала от заданного значения вызвано так называемым эффектом растекания спектра.

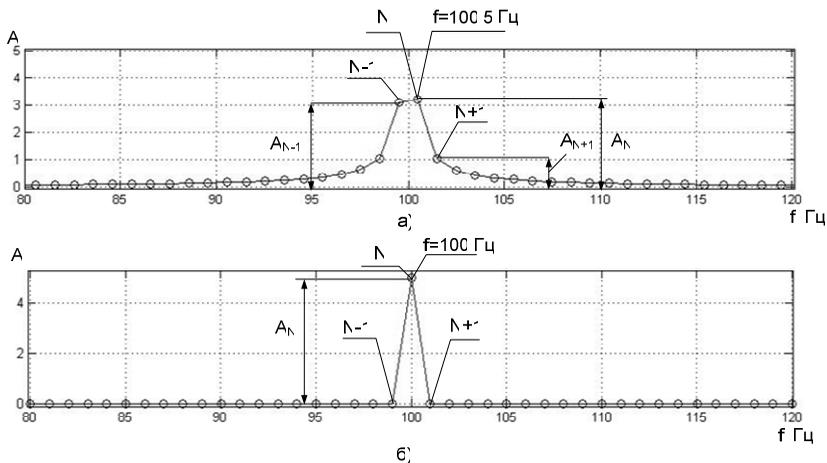


Рис. 1. Спектр сигнала $A(t)$ при различном времени записи сигнала $T_{зан}$: а – $T_{зан.1} = 1,005$ с; б – $T_{зан.2} = 1$ с

Спектр сигнала $A(t)$, который был получен при времени записи $T_{зан.2}$ (см. рис. 1, б), имеет одну ярко выраженную гармонику с частотой, равной 100 Гц и амплитудой $A_N = 5$, что полностью соответствует заданному сигналу. В данном случае эффект растекания спектра полностью отсутствует.

На основании проанализированной информации можно сделать вывод, что *увеличение погрешности определения частоты приводит к усилению эффекта растекания спектра и наоборот, чем меньше погрешность, тем слабее эффект растекания*. Данную зависимость можно использовать для оценки величины погрешности определения частоты.

Подбор оптимального времени записи сигнала может осуществляться согласно следующему выражению:

$$T_{зан.i} = T_{зан} - i \cdot \frac{1}{F_d}, \quad (3)$$

где $T_{зан.i}$ – время записи сигнала после i -го шагов уменьшения времени записи относительно исходного значения $T_{зан}$.

На каждом шаге уменьшения времени записи необходима оценка величины растекания спектра.

В ходе исследования было показано, что в качестве критерия, при котором эффект растекания спектра минимален, можно использовать величину V , определяемую следующим образом

$$V = (A_N - A_{N-1}) \cdot (A_N - A_{N+1}). \quad (4)$$

Эффект растекания спектра минимален при максимальном значении параметра V

$$V = (A_N - A_{N-1}) \cdot (A_N - A_{N+1}) = \max. \quad (5)$$

Данное выражение соответствует условиям:

$$V'(i) = 0; \quad V''(i) < 0. \quad (6)$$

Если условия (6) выполняются, то можно говорить о том, что погрешность определения частоты минимальна.

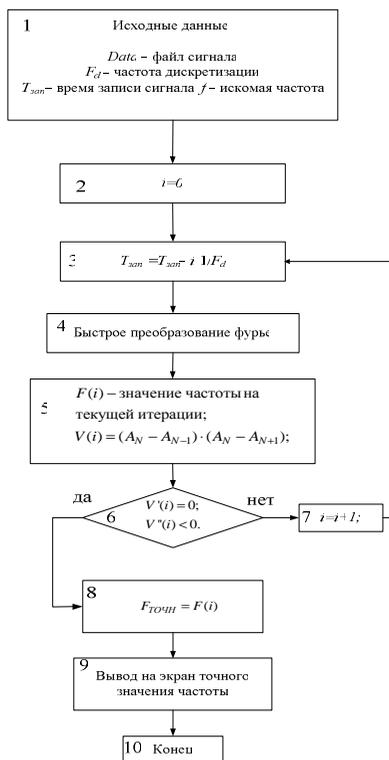


Рис. 2. Блок-схема алгоритма АВЗ

Для минимизации данной погрешности предлагается алгоритм автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС), позволяющий подобрать для любой гармонической составляющей спектра оптимальное время записи, при котором погрешность определения частоты минимальна.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Данный метод особенно эффективен при работе с низкочастотными составляющими. В зависимости от требуемой точности определения частоты алгоритм АВЗС позволяет добиться многократного уменьшения времени записи сигнала.

Библиографический список

1. Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя / Е.М. Новоселов [и др.] // Повышение эффективности работы энергосистем: тр. ИГЭУ. – Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009.– 572 с.

*М.В. Вахрин, студ.; А.В. Рассказчиков, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ИСПОЛНЕНИЯ КРУЭ

Применение КРУЭ позволяет значительно уменьшить площади и объемы, занимаемые распределительным устройством и обеспечить возможность более легкого расширения КРУЭ по сравнению с традиционными РУ.

Собирают КРУЭ из стандартных электрических элементов (выключателей, разъединителей, заземлителей, трансформаторов тока и напряжения, сборных и соединительных шин). Каждый элемент оборудования заключают в герметизированную металлическую заземленную оболочку, необходимую для сохранения изолирующей среды (элегаза) под определенным избыточным давлением. Оболочки изготавливают из немагнитного металла (сплав алюминия, конструкционная сталь) во избежание нагрева их переменным магнитным потоком.

Электрическое соединение элементов оборудования в КРУЭ выполняется разъемным через многоламельный контакт одного элемента с токопроводящим стержнем другого.

К недостаткам следует отнести высокую стоимость КРУЭ.

Ячейки КРУЭ изготавливают из унифицированных деталей, что делает возможным сборку ячеек различного назначения из одних и тех же элементов. К ним относятся: полюсы выключателей, разъединителей и

заземлителей; измерительные трансформаторы тока и напряжения; соединительные и промежуточные отсеки; сильфонные компенсаторы; секции сборных шин; полюсные и распределительные шкафы, шкафы системы контроля давления и шкафы трансформаторов напряжения.



Рис. 1. КРУЭ

Если проанализировать рынок, то мы получим, что основными производителями КРУЭ в России являются: ОАО «Энергомеханический завод», ОАО ВО «Электроаппарат», ФГУП ВЭИ, ОАО «Электрозавод».

А при анализе иностранных рынков можно выявить следующих основных поставщиков КРУЭ в различные страны: ABB, Siemens, Hyundai.

В России выпускается, в основном КРУЭ на напряжение до 110 – 220 кВ. Но в 2011 году на базе ОАО «Энергомеханический завод» были аттестованы новейшие ячейки КРУЭ на напряжение 330 и 500 кВ, которые являются представителем современного поколения элегазовых распределительных устройств.

Особенностью продукции ОАО «Энергомеханический завод», да и остальных отечественных производителей является то, что они не предлагают обширный перечень КРУЭ для различных электрических схем, а ограничиваются лишь базовыми сборочными единицами, из которых, по проекту заказчика, могут быть собраны различные варианты схем.

Особенностью зарубежных производителей является то, что ячейки рассчитаны на большее напряжение, чем российские (до 750 кВ). Но их производство поставлено на «конвейер», т.е. ячейки выполняются в виде стандартных компоновочных решений и, если нам потребуется, к примеру, схема «3/2», то мы сможем приобрести КРУЭ с фиксированными положением и размерами элементов.

В процессе рассмотрения продукции отечественных и зарубежных производителей КРУЭ можно выделить следующие особенности:

- отечественные КРУЭ можно выполнять на различные варианты схем, определять и компоновать ячейки в зависимости от особенностей проекта, а также возможно учесть последующие увеличения мощностей или видоизменения схем в виде установки «заглушек» в определенных частях ячейки, в которые потом можно будет дополнительно смонтировать другие присоединения;

- отечественные КРУЭ дешевле зарубежных;

- максимально возможный класс напряжения меньше, чем у зарубежных аналогов, но, в последнее время, этот недостаток стал активно устраняться за счет создания новых ячеек;

- выполнение в виде стандартных не видоизменяемых схем;

- зарубежное оборудование достаточно специфично, что предполагает наличие специализированного ремонтного и обслуживающего персонала.

Далее рассмотрим 2 примера улучшения конструкции КРУ, которые позволят уменьшить размеры ячейки и затраты на обслуживание и ремонт и увеличить ее ресурс.

Первым способом стоит отметить замену элегазового выключателя на вакуумный. Вакуумный выключатель имеет ряд преимуществ:

- высокая износостойкость при отключении как номинальных токов, так и токов КЗ, простота эксплуатации, снижение эксплуатационных затрат, бесшумность, чистота, удобство обслуживания, обусловленные отсутствием внешних эффектов и выделений при отключении токов КЗ, сравнительно малые габариты и масса выключателей, небольшие динамические воздействия на конструкции при работе;

- легкая замена вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) и ее произвольное положение при конструировании выключателя, высокое быстродействие выключателя, отсутствие загрязнения окружающей среды.

К недостаткам можно отнести:

- трудность при создании и изготовлении, связанная со сложностью вакуумного производства;

- склонность материалов контактов к сварке в условиях глубокого вакуума.

Вторым способом может стать замена стандартного ТТ на, так называемый оптико-электронный ТТ или просто – «оптический» ТТ. По сравнению с обычным ТТ, он имеет такие преимущества, как:

- возможность масштабного преобразования и измерения как переменного (до 100 кА), так и постоянного или импульсного (до 600 кА) тока различных уровней напряжений (до 800 кВ);

- оптико-электронное малоинерционное преобразование световых сигналов с отсутствием явлений гистерезиса, магнитного насыщения и

остаточного намагничивания, характерных для электромагнитных аналогов и ограничивающих их динамический диапазон и точность измерений;

- большой динамический диапазон (0,1 – 200 % Пном) и высокая точность (0,1 – 0,2 %) цифровой обработки, широкая полоса пропускания сигналов (не менее 6 кГц), возможность интеграции в измерительные и информационные системы с использованием различных интерфейсов – аналоговых, дискретных и цифровых – и исключением влияния вторичной нагрузки на процессы измерения;

- высокая помехоустойчивость к электромагнитным помехам;

- долговечность, долговременная стабильность и высокая повторяемость метрологических параметров изделий;

- низкая восприимчивость к вибрациям и изменениям температуры;

- малые весогабаритные параметры, упрощающие и облегчающие монтаж, а также позволяющие устанавливать изделия в ограниченном пространстве, в любом положении, с установкой на опору или путем подвешивания к жесткой шине.

Посмотрим, на сколько же возможно с помощью данных способов уменьшить габариты ячейки. Анализ проведем на основе ячейки ЯГК-100 в исполнении «контейнер».

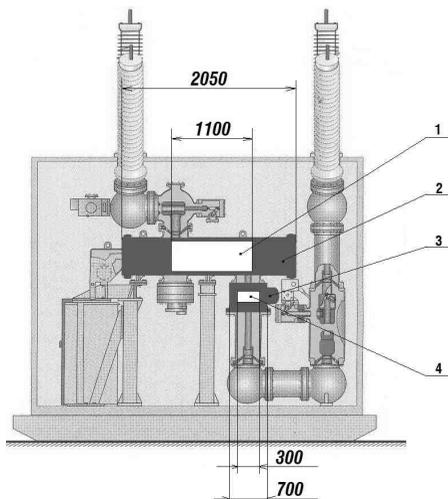


Рис. 2. Ячейка ЯГТ-110 в исполнении «контейнер»: 1 – вакуумный выключатель; 2 – элегазовый выключатель; 3 – обычный ТТ; 4 – оптический ТТ

Исходя из рис. 2, ширину ячейки можно будет уменьшить примерно на 1 м, а высоту – на 0,5 м, что при габаритах ячейки (4 м ширина и 3 м

высота) очень даже неплохо. Если сравнить технические параметры данных замен, то можно увидеть, что у выключателя повысится коммутационный ресурс, а у ТТ – класс точности (0,1 – 0,2S по сравнению с 0,5 – 0,5S) и диапазон измерения (0,1 – 200 %)-Пном по сравнению с (10 – 100 %)-Пном.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.1.038-2001. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновений. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
2. **Каталог** оборудования 2004-2005 / ЗАО ПФ «КТП-Урал». – М.: 2005.
3. **Волоконно-оптические датчики тока** / Е. Некрашевич, Н. Старостин // Электронные компоненты. – 2006. – № 11.
4. **Ячейка 110 кВ** в исполнении «Контейнер» / ОАО «Энергомеханический завод. – СПб.: 2010.

*Д.И. Константинов, асп. ЧГУ;
Г.М. Михеев, д.т.н., доцент
(ЧПИ (филиал) МГОУ, г. Чебоксары)*

О ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Чтобы скомпенсировать колебания напряжения на шинах подстанции необходимо переключаться с одного ответвления обмотки трансформатора на другое, с отличающимся числом витков. Сегодня эта процедура выполняется с помощью так называемых переключающих устройств, именуемых регуляторами напряжения под нагрузкой (РПН), работающие как программно-механические коммутаторы. В зависимости от класса напряжения и мощности, на силовых трансформаторах энергосистемы России и на промышленных предприятиях в настоящее время используются такие РПН, как РС (производства Болгарии), РНОА (производства Украины), SDV, SAV, SCV (производства Германии), РНТА (производства России) и т.д.

Все рассматриваемые регулирующие устройства имеют активные токоограничивающие резисторы, не рассчитанные на длительное прохождение тока. По этой причине одной из важнейших характеристик таких РПН является быстродействие контактов, в противном случае, при переключении выделялось бы большое количество тепла и габаритные разме-

ры сопротивлений получились бы очень большими. Поэтому, в переключающих устройствах с токоограничивающими резисторами переключение контактора происходит под действием мощных пружин; таким образом, исключается возможность останова контактора в промежуточном положении даже при отключении питания приводного механизма [1, 2].

Наличие резисторов, рассчитанных на кратковременную работу, мощных аккумулирующих пружин, а также большие скорости подвижных частей и связанные с этим механические удары заставляют предъявлять весьма жёсткие требования к надёжности конструкции, качеству материалов и точности изготовления [3].

В подобных устройствах переключение должно длиться не более определённого времени, так как в противном случае произойдёт быстрый износ контактов. Схема работы контактов контактора, осциллограмма и время цикла одного из распространённых переключающих устройств типа РС показаны на рис. 1.

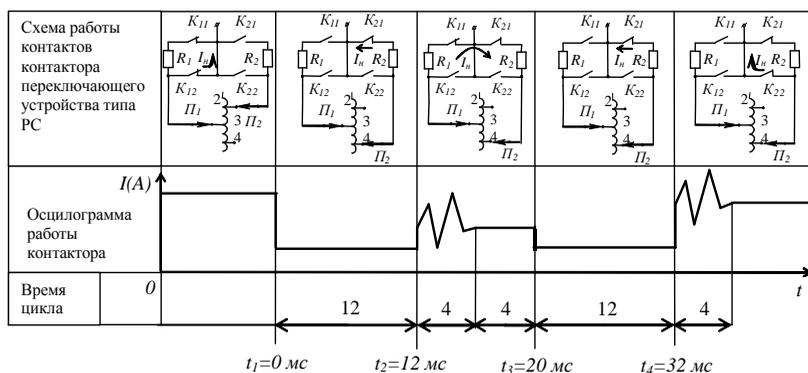


Рис. 1. Регистрирование процесса переключения контактора РПН типа РС во время переключения со второго ответвления обмотки трансформатора на третье: K_{11} , K_{21} – главные контакты, K_{12} , K_{22} – вспомогательные контакты; Π_1 , Π_2 – контакты переключателя; R_1 , R_2 – токоограничивающие резисторы

Из рисунка видно, что время переключения $t_4 = (t_1 + t_2 + t_3)$ контактной системы контактора РПН типа РС составляет не более 40 мс. Длительность переключения РПН с одного ответвления на другое составляет не более 1 с [2]. Заметим, что под длительностью переключения РПН понимают время работы контактов контактора и переключателей Π_1 и Π_2 .

Окружающая нас техника стремительно видоизменяется. Технический прогресс предоставляет манящие возможности и требует применения более совершенных устройств, эффективных и способных адаптиро-

ваться к новым условиям работы. В то же время все эти новые устройства так быстро стареют, что порой оказываются на свалке истории. Всё это в полной мере может относиться и к переключателям силовых трансформаторов в таком виде, какими они сегодня существуют. Как показывает статистика, 30 % повреждений силовых трансформаторов происходит именно из-за отказа РПН [4]. Данную проблему можно решить отказом от электромеханических коммутаторов и переходом к твёрдотельным переключателям, использующими свойства полупроводникового перехода. Надёжность таких переключателей гораздо выше. Однако управлять ими существенно сложнее. Но и это вполне достижимо. Реализация проекта повысит не только качество электрической энергии, но также увеличит надёжность топологии электроэнергетической сети.

Очевидно, что при применении твёрдотельных устройств, временные параметры переключения контактов переключателей устройств, указанные на рис. 1 будут легко изменены в сторону их уменьшения.

Библиографический список

1. **Порудоминский, В.В.** Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В.В. Порудоминский. – М.: Энергия, 1974. – 288 с.
2. **Якобсон, И.Я.** Наладка и эксплуатация переключателей силовых трансформаторов / И.Я. Якобсон. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.
3. **Методические** указания по наладке устройств переключения ответвлений обмоток под нагрузкой (Производства НРБ и ГДР) трансформаторов РПН. – М.: Союзтехэнерго, 1981. – 44 с.
4. **Михеев, Г.М.** Электростанции и электрические сети диагностика и контроль электрооборудования / Г.М. Михеев. – М.: Издательский дом «ДОДЭКА XXI», 2010. – 224 с.

*С.А. Абдуллаева, вед. инж.; рук. А.З. Мурадалиев, к.т.н., доцент
(АзНИПИИ Энергетики, г.Баку)*

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Повышение надёжности выключателей с каждым годом приобретает все большую значимость. Объясняется это, прежде всего, с превышением срока службы выключателей расчетной величины, возрастающим несоответствием структурной надёжности схем распределительных устройств предъявляемым требованиям. Повышение надёжности выключателей может быть достигнуто своевременным плановым ремонтом, который

в настоящее время выполняется при превышении числа отключаемых коротких замыканий N допустимой величины $N_{\text{доп}}$ или при превышении межремонтного периода регламентированного значения.

Известно, что наиболее эффективной формой планового восстановления износа выключателей, как и любого другого энергетического оборудования, является ремонт по техническому состоянию. Техническое состояние выключателей устанавливается по данным его периодических испытаний, в процессе которых измеряются диагностические показатели (ДП), характеризующие электрические, тепловые, механические и иные свойства отдельных узлов выключателей. Результаты измерения ДП сопоставляются с нормативными значениями и выносятся заключение о соответствии или несоответствии технического состояния выключателей предъявляемым требованиям. Однако, остается открытым вопрос о безотказности выключателей в предстоящий межремонтный период, т.к. не определяются показатели долговечности: ни остаточный ресурс выключателей, ни остаточный срок службы и его превышение длительности межремонтного периода.

В [1] были рассмотрены модели износа выключателей и определены отмеченных выше показателей долговечности в предположении, что предельное значение износа имеет место при $N = N_{\text{доп}}$, а косвенно характеризующая износ величина $N_{\text{доп}}$ однозначно соответствует предельным значениям ДП, непосредственно отражающих степень разрегулировки. К числу таких показателей относятся временные характеристики выключателей. По мере старения однозначность соответствия N и ДП нарушается. Действительно, несмотря на проведение ремонтных работ полностью восстановить износ без замены элементов на новые невозможно. И хотя после планового ремонта величина N естественно принимается равной нулю, элементы электроустановок содержат некоторый неустранимый износ, обусловленный изменением свойств материала. Остаточный износ в течение срока службы элемента тем больше, чем больше предшествовало воздействий и чем «тяжесть» этих воздействий была больше. При эксплуатации выключателей, соглашаясь с наличием остаточного износа (элементы не новые), тем не менее, принимается предположение о неизменности $N_{\text{доп}}$.

Закономерности изменения свойств материала, определяются условиями работы и не всегда линейны. Так известна нелинейность процессов накопления усталостной прочности металла, изменения электрических характеристик изоляции обмоток вследствие перегрузок по току и др.

Будем различать три разновидности процессов дискретного износа для однотипных воздействий:

1. Каждое воздействие вызывает постоянную величину износа равную ΔIz . Для элементов электроустановок постоянная величина изменения износа наблюдается на элементах, износ которых не превышает регламентируемых заводом-изготовителем значений.

2. Износ каждого последующего воздействия в момент t_2 [$\Delta Iz(t_2)$] меньше износа от предыдущего воздействия в момент t_1 $\Delta Iz(t_1)$, т.е. $\Delta Iz(t_1) > \Delta Iz(t_2)$, $t_2 > t_1$. Обуславливается это тем, что элементы «приспосабливаются» к условиям работы и проявляется обычно после плановых ремонтов.

3. Износ каждого последующего воздействия превышает износ от предыдущего воздействия, т.е. $\Delta Iz(t_1) < \Delta Iz(t_2)$, где $t_2 > t_1$. Этот процесс именуется катастрофическим износом и имеет место при эксплуатации электроустановок, техническое состояние которых не удовлетворяет предъявляемым требованиям (ДП превышают допустимые значения).

Главной задачей эксплуатации электроустановок является повышение качества проводимых плановых ремонтов и предотвращение катастрофического износа. Увеличение остаточного износа приводит к уменьшению фактического значения допустимого числа дискретных воздействий $N_{\text{доп}}$ и, соответственно к увеличению числа дискретных воздействий, ведущих к катастрофическому износу и росту вероятности аварийного повреждения элемента и электроустановки в целом. Таким образом, оценка технического состояния по условию не превышения числа допустимой величины $N_{\text{доп}}$, для элементов, срок службы которых приближается к расчетному ($T_{\text{доп.р}}$), или превышает его, может привести к уменьшению числа отказов. Оценка ПД элементов с $T_d \geq T_{\text{доп.р}}$ наиболее просто может быть выполнена путем снижения $N_{\text{доп}}$ до величины, отражающей остаточный износ элемента. Однако величину остаточного износа можно оценить лишь в результате сложных экспериментальных исследований и применить изложенный выше алгоритм расчета ПД невозможно. Преодолеть эту трудность можно следующим образом.

1. Проводится измерение ДП оборудования в момент t_k через интервал $\Delta t = t_k - t_p$ после окончания ремонта в момент t_p . Рекомендуется Δt выбирать таким, чтобы $N_0(\Delta t) = (0,4 - 0,6)N_{\text{доп}}$. Обозначим множество этих ДП через $\Pi_i(t_k)$, где n – число показателей.

2. Вычисляется величина износа по каждому ДП

$$Iz(\Pi_i, t_k) = \frac{\Pi_i(t_k) - \Pi_i(t_p)}{\Pi_{\text{доп}} - \Pi_0}, \quad (1)$$

где Π_0 – исходное значение i -го ДП.

3. Определяется число единичных воздействий в течение интервала Δt_n

$$N_0(\Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{N_{0,i}(\Delta t)}{\xi_{1,i}}, \quad (2)$$

где $N_{0,i}(\Delta t)$ – наблюдаемое за интервал число воздействий i -го типа; n – число однотипных воздействий; $\xi_{1,i}$ – относительная тяжесть воздействия, равная отношению $N_{\text{доп}}$ и $N_{\text{доп},i}$; $N_{\text{доп},i}$ – допустимое число воздействий i -го типа

4. Вычисляется величина изменение износа на одно единичное воздействие по формуле

$$\Delta I_z(\Pi_i, t_K) = \frac{I_z(\Pi_i, t_K)}{N_0(\Delta t)}. \quad (3)$$

5. Определяется расчетное значение допустимого числа единичных воздействий ($N_{\text{доп},i}$)

$$N_{\text{доп},i}^* = \frac{1}{\Delta I_z(\Pi_i, t_K)}; \quad i = 1, n. \quad (4)$$

6. Определяется величина остаточного ресурса по числу элементарных воздействий для каждого ДП

$$\text{Re}[N_i] = \frac{N_{\text{доп},i} - N_0(\Delta t)}{N_{\text{доп},i}^*}. \quad (5)$$

7. Определяется остаточный ресурс оборудования исходя из условия

$$\text{Re}(N) = \min[\text{Re}(N_1), \text{Re}(N_2), \dots, \text{Re}(N_n)]. \quad (6)$$

8. По формулам [2]

$$P(T_{\text{доп.}}) = 1 - \sum_{i=1}^n \left[\sum_{r_i=0}^{A_i} \prod_{j=1}^m P_j(r_i, T_{\text{доп.}}) \right]; \quad (7)$$

$$A_i = I \left[N_{\text{доп},i} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{j \cdot \xi_{1,j}}{\xi_{1,i}} \right]; \quad (8)$$

$$P_j(r_i, T_{\text{доп.}}) = \frac{(\omega_j T_{\text{доп.}})^{r_i}}{r_i!} e^{-\omega_j T_{\text{доп.}}}, \quad (9)$$

ω_j – интенсивность j -го воздействия токов короткого замыкания на выключатель; I – оператор, определяющий целую часть расчетной величины неиспользуемого ресурса.

При $N_{\text{доп}} = \min(N_{\text{доп},1}, N_{\text{доп},2}, \dots, N_{\text{доп},n})$ рассчитываются функция распределения $F(T_d)$, нижнее граничное значение доверительного интервала (I_d) и среднее значение T_d и среднее значение $M^*(T_d)$.

В ряде случаев число воздействий исчисляется сотнями или тысячами. При этом непосредственное применение приведенных выше формул требует выполнения громоздких вычислений. Кроме того, сам единичный износ оказывается столь малым, что оценить его известными средствами измерения практически невозможно. В этом случае целесообразно проводить расчеты для приведенного (pr) числа воздействий.

Заключение

1. Для элементов, срок службы которых превышает расчетный, проводить ремонтные работы по критерию непревышения установленно-го допустимого числа единичных воздействий недопустимо.

2. Разработан алгоритм оценки показателей долговечности элементов выключателей, износ которых происходит преимущественно в результате дискретных воздействий.

Библиографический список

1. Фархадзаде, Э.М. Модели для оценки показателей долговечности элементов электроустановок при дискретных воздействиях / Э.М. Фархадзаде, С.А. Абдуллаева.

*С.М. Исмаилова, вед. инж.; рук. Т.К. Рафиева, к.т.н.
(АзНИПИИ Энергетики, г.Баку)*

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Анализ паспортных и эксплуатационных данных силовых трансформаторов и автотрансформаторов (ТР), установленных на станциях и предприятиях электрических сетей системы Азербайджанской энергии позволил установить:

1. Значительная часть парка ТР превышает нормативный срок службы 25 лет [1];

2. Испытания ТР на предприятиях системы Азербайджанской энергии проводятся в неполном объеме. Объясняется тем, что на местах:

- отсутствуют современные приборы и устройства, обеспечивающие возможность контроля.

- отсутствует необходимая методическая литература по обеспечению технического состояния силовых трансформаторов;

- уровень подготовки персонала, ответственного за контроль и обеспечение технического состояния ТР, является недостаточным;

3. Периодичность и объем капитального ремонта ТР проводится по регламентированной схеме. Это зачастую приводит к систематическому росту эксплуатационных затрат. Переход к ремонту по техническому состоянию требует привлечения больших объемов информации, применения наукоемких методов расчета.

Следует отметить, что аналогичные трудности характерны для энергосистем СНГ, в том числе энергосистемы России [2].

Сведения о сроках службы и конструктивных особенностях ТР напряжением 110 кВ и выше. Анализ эксплуатации ТР с номинальным напряжением 110 кВ и выше показывает, что более 45 % таких ТР превысили нормативный срок службы. Возраст некоторых ТР (около 7 %) превышает 40 лет. В ближайшие 5 лет число ТР, срок службы которых превысил нормативный, составит около 70 %.

Известные экономические трудности не позволяют заменить ТР, если срок службы превысил нормативный. Такая же картина износа парка ТР наблюдается и во многих энергосистемах стран СНГ, Европы и Америки [3]. Поэтому все более актуальной становится оценка возможности дальнейшей эксплуатации ТР и обоснованного продления сроков службы.

Несоответствие современных требований и контроля технического состояния ТР реальной практике контроля. В соответствии с Правилами технической эксплуатации (ПТЭ) и РД «Объем и Normы испытания электрооборудования» [4] «ремонты ТР и реакторов (капитальный и текущий) и их составных частей (РПН, систем охлаждения и др.) выполняются по мере необходимости в зависимости от их технического состояния, определяемого испытаниями и внешним осмотром. Осмотры ТР (реакторов) без отключения проводятся в сроки, установленные техническим руководителем объекта в зависимости от их назначения, места установки, срока службы и технического состояния». Расходование остаточного ресурса ТР зависит от множества факторов, таких как нагрузка, количество и величина сквозных токов короткого замыкания, качества обслуживания и др. Для каждого ТР процесс расходования остаточного ресурса индивидуален. Таким образом, необходимость объективной оценки технического состояния ТР оговорено в основных РД.

В настоящее время наиболее эффективными методами диагностики и параметрами оценки технического состояния ТР считаются [5]:

- хроматографический анализ газов, растворенных в масле (ХАРГ);
- контроль изменения объема фурановых соединений;
- измерение степени полимеризации бумажной изоляции;
- измерение интенсивности частичных разрядов;
- тепловизионный контроль.

В соответствии с [4] контроль соответствия технического состояния электрооборудования, в том числе и ТР, предъявляемым требованиям проводится путем сравнения результатов измерения диагностических параметров с их предельно-допустимыми значениями. Однако, такое сравнение позволяет выявить возникшие дефекты, которые лишь случайно не привели к отказу оборудования (около 3 %) Значительная часть таких дефектов привела к отказам или необходимости отключения ТР по аварийной заявке.

В [6] разработан новый подход к оценке технического состояния СТ. Суть его заключается в количественной оценке износа (остаточного ресурса) и остаточного срока службы до отказа. Разработанный метод позволит перейти от констатации факта наличия дефекта к количественной оценке показателей технического состояния, как отдельных узлов, так и ТР в целом, и тем самым установить время возникновения дефекта.

Известно, что стоимость комплекта приборов и устройств для оценки технического состояния ТР не превышает 10% его стоимости. При этом необходимо учесть, что приобретенный предприятием комплект приборов позволяет произвести оценку технического состояния по сути всех ТР предприятия, число которых исчисляется десятками.

АИС контроля технического состояния ТР. В соответствии с [4] «техническое состояние электрооборудования определяется не только путем сравнения результатов конкретных испытаний с нормируемыми значениями, но и по совокупности результатов всех проведенных испытаний, осмотров и данных эксплуатации. Значения, полученные при испытаниях, во всех случаях должны быть сопоставлены с результатами измерения на других фазах и на однотипном оборудовании. Однако главным является сопоставление измерений при испытании значений параметров электрооборудования с их исходными значениями и различие с допустимыми значениями».

Контроль технического состояния ТР требует создания больших массивов данных о нагрузках, отказах, испытаниях и ремонтах. Громоздкость и трудоемкость ручного счета, наукоемкость методов оценки показателей индивидуальной надежности, обуславливают целесообразность применения автоматизированной системы. Целью системы являлось бы информационная поддержка персонала, ответственного за обеспечение соответствия технического состояния ТР предъявляемым требованиям.

В настоящее время разработан ряд таких автоматизированных систем. Чаще всего эти системы решают одну из возможных эксплуатационных задач. В частности, к ним относятся системы анализа информации об отказах, системы хроматографического анализа масла и др. В разработанных системах не учитывается случайный характер оценок показателей надежности, целесообразность классификации статистических данных по заданным разновидностям признаков, особенности расчета показателей долговечности.

В лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АзНИПИИ Энергетики разработана локальная автоматизированная информационная системы анализа технического состояния силовых трансформаторов (АИСТР).

На рис. 1 приведена укрупненная структура этой информационной системы. Выделены три логически взаимосвязанных блока.

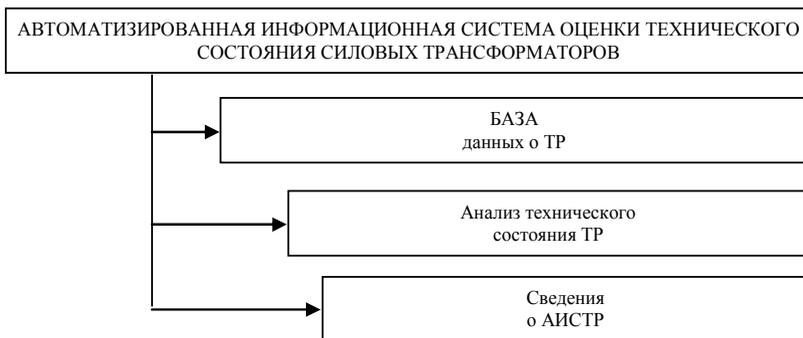


Рис. 1. Укрупненная структура этой информационной системы

Первый блок «База данных», обеспечивает возможность ввода, хранения, просмотра и корректировки информации о ТР. Второй блок выполняет основную функцию «Анализ технического состояния». Третий блок обеспечивает возможности практического использования АИС и именуется как «Сведения об АИСТР».

Библиографический список

1. **Силовые** трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
2. РД 153-34.3-46.304-00. Положение об экспертной системе контроля и оценки состояния и условий эксплуатации силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, измерительных трансформаторов тока и напряжения.
3. **Силовые** трансформаторы и системы диагностики // Итоги IV науч.-техн. конф., 23 – 24 июня 2009. – М., 2009.

4. РД 34.45-51.300-97. Объем и Нормы испытаний силовых трансформаторов. – 6-е изд., доп. - РАО ЕЭС России, 1998.

5. РД ЭО 0410–02. Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов. – М.: Росэнергоатом, 2003.

6. Фархадзаде, Э.М. Методы оценки долговечности невосстанавливаемых элементов / Э.М. Фархадзаде, А.З. Мурадалиев, А.Д. Никджу // Проблемы энергетики. –2001. – № 1. – С. 21 – 30.

*А.А. Кротиков, студ., Н.В. Глотова, асп.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

В условиях рыночных отношений в энергетике к работе электрооборудования (ЭО) предъявляются повышенные требования надежности. Причиной снижения эксплуатационной надежности ЭО в настоящее время является высокая степень его износа около (60 – 70 %). [1]

В России обновления оборудования электроэнергетических фондов не превышает 3 – 5 % в год [1], что говорит о невозможности заменить все оборудование в кратчайшие сроки. Выбор рациональной стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) ЭО, позволит повысить надежность и уменьшить затраты на обслуживание ЭО.

Основные стратегии ремонтов, используемые в мировой практике:

- реактивная (ремонт по отказу, то есть по реакции на возникающие несоответствия);
- превентивная («классическая» схема ППР);
- предиктивная (или ремонт по состоянию оборудования);
- проактивная (стратегия, при которой отыскиваются причины основных отказов, и вырабатывается комплекс мер по устранению коренных причин).

Большой интерес вызывает стратегия обслуживания, ориентированная на надежность, которая интегрирует все ранее упомянутые стратегии и дает методологию выбора наилучшего вида обслуживания для конкретного производственного актива, в зависимости от его критичности и применимости той или иной стратегии. Внедрение современных стратегий ремонта невозможно без использования программного комплекса (ПК) управления ТОиР электрооборудования, которые накапливают све-

дения о состоянии оборудования и реализуют процедуры планирования на основе новых стратегий ремонта [2].

ПК управления ТОиР электрооборудования нашли широкое распространение за рубежом, в России они появились относительно недавно и особенно широко используются в энергетике. Энергетические компании используют, как готовые зарубежные системы, так и ведут собственные разработки.

Произведем сравнительный анализ двух наиболее известных ПК. Фирма СпецТек предлагает программный комплекс «TRIM-Технический менеджмент» в качестве программной и методической платформы для создания ПК объектом управления основными фондами, ТОиР, являются процессы жизненного цикла:

- приобретение оборудования, запчастей;
- эксплуатация и активное использование основных фондов;
- техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), реконструкция и модернизация;
- списание и обновление объектов основных фондов.

Программный комплекс «TRIM-Технический менеджмент» обеспечивает создание и поддержание единого информационного пространства в части управления указанными процессами с учетом разграничения полномочий должностных лиц и территориально-распределенной структуры предприятия.

Решает следующие задачи: поддержание работоспособности оборудования; повышение прозрачности и качества учета: оборудования, затрат на ТОиР и истории эксплуатации; повышение эффективности использования оборудования при приемлемом уровне рисков; повышение или обеспечение необходимого уровня надежности; оптимизация стоимости владения основными фондами; оптимизация программ ТОиР по критерию надежности; повышение производительности ремонтно-эксплуатационного персонала; оптимизация затрат на материально-техническое обеспечение ТОиР.

Выполняемые функции: ведение нормативно-справочной информации по ТОиР; ведение эксплуатационной, технической и ремонтной документации; формирование и сопровождение базы данных объектов основных фондов; оценка состояния оборудования; выбор стратегий обслуживания; планирование работ и ресурсов; формирование плановых потребностей в материально-технических ресурсах (МТР) для ремонтных работ; обеспечение потребностей в МТР; обеспечение безопасных условий работы; ведение и обработка заявок на внеплановые работы; организация выполнения и учета работ по ТОиР; измерение и анализ целевых показателей процессов, принятие решений.

Используя преимущества программного комплекса TRIM-Технический менеджмент: пользователь получает программное обеспечение для решения всех задач ТОиР; возможность ведения нормативно-справочной информации по ТОиР; при необходимости может быть объединена с решениями сторонних разработчиков; не нуждается в адаптации для российского рынка; способна работать самостоятельно без дополнительном приобретении полного пакета программного комплекса TRIM; отображение структуры предприятия с помощью гибких организационных единиц.

Недостатки программного комплекса TRIM-Технический менеджмент: большой объем подготовительных работ перед пуском в промышленную эксплуатацию; усложнение заявочной компании [3].

Техобслуживание и ремонт оборудования в SAP-системе (приложение РМ). Приложение РМ входит в состав крупной информационной системы SAP ERP. SAP Enterprise Resource Planning (ERP) – это интегрированное решение, предлагающее широкую функциональные возможности по управлению внутренними и внешними ресурсами предприятия.

При помощи приложения РМ можно автоматизировать процессы ТОиР в компании. Объектами техобслуживания может быть как оборудование, принадлежащее компании, так и оборудование заказчиков, которым оказываются услуги по техобслуживанию. Для решения этих задач задаются технические рабочие места, единицы оборудования, спецификации ТОиР, технологические карты ТОиР и т.д.

Имеется возможность реализовать плановое предупредительное техобслуживание и ремонт оборудования. Можно также создавать сообщения о ТОиР и заказы на ТОиР автоматически по контролю и измерений. Система, так же позволяет хранить историю ТОиР для анализа мероприятий по техобслуживанию и сбора полной информации по расходу запасных частей.

Решает следующие задачи: сокращение простоев и делать их планируемыми; целенаправленно использовать персонал в рамках заказов ТОиР; снизить затраты на технический осмотр и предупредительное ТОиР;

Выполняемые функции: ведение истории ремонта и технического обслуживания оборудования; планирование графика ремонта и состава ремонтных работ, затрат на ремонт; контроль за фактическим исполнением ремонта.

Система сервисного обслуживания в рамках комплексной системы SAP R/3 позволяет управлять мероприятиями сервиса, техническим обслуживанием и восстановлением. В систему вводятся заявки на обслуживание, которые затем обрабатываются, преобразуются в заказы на обслуживание либо в заказы клиентов.

Используя прикладную систему SAP PM: пользователь получает программное обеспечение для решения всех задач ТОиР. К ней можно подключать внешние системы. Единый графический интерфейс пользователя упрощает обслуживание во всех прикладных областях. Выдаются разрешения на работу в двух вариантах: обучающая и продуктивная системы. В первой будет проходить обучение и ознакомление с системой, в продуктивной будет осуществляться непосредственно рабочий процесс с реальными данными и оборудованием. Наличие фоновго режима в SAP позволяет автоматизировать типовые задачи, а также помогает сэкономить компьютерные ресурсы. Отображение комплексных структур предприятия с помощью гибких организационных единиц. Представление планирующих и исполняющих организационных единиц в рамках ТОиР.

Недостатки прикладной системы SAP PM: усложнение заявочной компании; ошибки в данных внесенных в один из блоков системы могут отразиться на работе других приложений, что может создавать проблему всей системы; большой объем подготовительных работ перед вводом в промышленную эксплуатацию; является частью крупной информационной системы SAP ERP и выполняет все свои функции только внутри системы.

Вывод

Обе системы имеют, как преимущества, так и недостатки. Общими недостатками являются: сложность заявочной компании; необходимость обучения персонала работе с системами; большой объем подготовительных работ перед вводом в промышленную эксплуатацию; необходимость возможность ввода данных в систему непосредственно на их объекте.

Индивидуальные преимущества каждого комплекса:

TRIM-Технический менеджмент.

- Ориентировано на российский рынок.
- Решение направленно на ТОиР и имеет широкий ассортимент инструментов для его реализации.

Техобслуживание и ремонт оборудования в SAP-системе.

- Выдаются полномочия на работу в двух вариантах: обучающая система и продуктивная система. В первой будет проходить обучение и ознакомление с системой, в продуктивной будет осуществляться непосредственно рабочий процесс с реальными данными и оборудованием.
- Единый графический интерфейс пользователя упрощает обслуживание во всех прикладных областях.
- Наличие фоновго режима в SAP позволяет автоматизировать типовые задачи, а также помогает сэкономить компьютерные ресурсы.

Таким образом, решение TRIM-Технический менеджмент эффективен при использовании в сфере управления основными фондами и ТОиР,

в то время как приложение SAP PM более удобно для управления всеми сферами предприятия в рамках информационной системы SAP ERP.

Библиографический список

1. **Стратегия** развития электросетевого комплекса Российской Федерации от 2013 г.
2. **Зачем** ремонтнику компьютер? [Электронный ресурс] / Б.А. Кац. – Режим доступа: <http://www.mirprom.ru/public/zachem-remontniku-kompyuter.html> (26.06.2012).
3. <http://www.trim.ru>.

*В.В. Сталович, асп.; рук. В.Н. Радкевич, к.т.н., доцент
(БНТУ, г. Минск)*

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОДСТАНЦИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 20/0,4 кВ

Контроль технического состояния и режима работы силовых трансформаторов позволяет повысить эффективность эксплуатации трансформаторных подстанций (ТП) напряжением 6 – 20/0,4 кВ, прогнозировать отказы и увеличить вероятность своевременного обнаружения повреждений. С развитием новых методов диагностирования, дистанционного контроля и испытания трансформаторов без вывода их из работы [1], появляется возможность создавать современные автоматизированные системы эксплуатационного контроля. Переход к непрерывному контролю позволит сократить количество аварий и незапланированных ремонтов, и, следовательно, снизить затраты времени на устранение отказов и эксплуатационные расходы. Снижение количества внезапных отказов позволит избежать дополнительных потерь, связанных с устранением их последствий и недоотпуском электроэнергии потребителям. Кроме того, за счет работы эксплуатируемого оборудования в безопасном для него режиме можно продлить срок службы трансформаторов [2]. При этом, возникают вопросы экономического обоснования объема контроля на подстанциях, так как только рациональное диагностирование позволит уменьшить затраты на эксплуатацию и обслуживание как трансформаторов, так и другого электрооборудования подстанции.

Согласно [3] методы определения технического состояния трансформаторов, в зависимости от целей и глубины контроля, можно разбить на три группы.

В первую группу входят просто реализуемые методы интегрального контроля, позволяющие получить данные об ухудшении технического состояния объекта без особой детализации дефектов и оценки их опасности.

Вторая группа методов позволяет выявить дефекты, которые могут возникнуть при ряде особых режимов работы оборудования или после определенного количества операций.

Третья группа включает весь набор методов испытаний, позволяющих обнаружить и классифицировать возможные дефекты с целью оценки технического состояния объекта и оценки его изменений.

Для ТП напряжением 6 – 20/0,4 кВ при непрерывном наблюдении за трансформаторами целесообразно использовать методы первой группы, так как методы второй и третьей группы основаны на использовании достаточно дорогостоящих модулей и аппаратуры и предназначены в основном для диагностического персонала. Для оперативного и дежурного персонала обычно достаточно минимальных сведений о состоянии оборудования.

Классификация повреждений трансформаторов показала, что надежность современного трансформатора в значительной мере зависит от состояния его изоляции [2, 3]. Основными причинами старения и разрушения изоляционных материалов в трансформаторе являются электрические и термические воздействия, а также в определенной степени увлажнение и загрязнение изоляции.

Согласно ГОСТ 11677-85 силовые трансформаторы по исполнению изоляции классифицируются на масляные, заполненные негорючим жидким диэлектриком, сухие и с элегазовой изоляцией. Современной тенденцией построения распределительных сетей напряжением 6 – 20 кВ разнообразных объектов (производственных, коммунально-бытовых, гражданских) является применение герметичных масляных трансформаторов типа ТМГ11, ТМГ12, ТМГ13, ТМГ21, ТМГ24 и т.п. Другие типы силовых трансформаторов применяются при соответствующем обосновании.

Удельный износ изоляции зависит от режима работы трансформатора и температуры окружающей среды. В реальных условиях эксплуатации нагрузка трансформатора, как правило, не бывает полной и постоянной. Многочисленные исследования, выполненные в различных странах, показали, что относительный износ изоляции ускоряется в два раза при превышении её температуры на 8 – 10 °С [2,4]. Это связано с зависимостью скорости химической реакции от температуры. Изоляция обычно теряет свои свойства не вследствие внезапного пробоя при некоторой критической температуре, а, как правило, из-за постепенного разрушения ее с течением времени. Для силовых масляных трансформаторов согласно ГОСТ 14209-85 принято шестиградусное правило, позволяющее соз-

дать некоторый запас прочности, поскольку расчеты на термическую стойкость зачастую имеют невысокую точность.

Предлагается на ТП напряжением 6 – 20/0,4 кВ с целью исследования режима работы силового трансформатора и определения его резерва мощности, а также остаточного срока службы и износа изоляции использовать относительно простой метод, основанный на контроле температуры воздуха и температуры изоляции трансформатора. В основу метода может быть положена математическая модель оценки технического состояния трансформатора по данным параметрам [2, 4].

В общем виде функция определения остаточного срока службы силового трансформатора, износа изоляции или резерва мощности выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = f(\Delta t, \theta_{\text{окр.ср } i}, \theta_{\text{изол } i}, k_1, k_2, k_j, \dots, k_n).$$

где Δt – интервал осреднения, с; $\theta_{\text{окр.ср } i}$ – температура окружающей среды (воздуха) в момент времени t_i , °С; $\theta_{\text{изол } i}$ – температура наиболее нагретой точки изоляции в момент времени t_i , °С; I_i – значение полного тока нагрузки в момент времени t_i , А; $k_1, k_2, k_j, \dots, k_n$ – коэффициенты, полученные расчетным и эмпирическим путем для данного типа силового трансформатора и его режима работы.

Непрерывное измерение температуры и тока нагрузки трансформатора формируется в определенном рода импульсы в зависимости от тепловой нагрузки трансформатора. За счет применения простого и дешевого устройства достигается повышение эффективности использования трансформаторного парка объектов электроснабжения, снижение объема работ обслуживающего персонала при определении резервной мощности трансформатора и износа изоляции. Данный метод с минимальными затратами времени и ресурсов позволяет классифицировать силовые трансформаторы по остаточному сроку службы и надежности, т.е. провести так называемое ранжирование по фактическому техническому состоянию [5]. Это дает возможность выявить наименее надежное оборудование и сконцентрировать имеющиеся ресурсы на профилактические работы, восстановление технических характеристик или замену трансформаторов.

Таким образом, совершенствование системы контроля состояния оборудования трансформаторных подстанций является задачей поддержания его работоспособности и уровня надежности электроснабжения потребителей электроэнергии в целом [6].

Библиографический список

1. Алпатов, М.Е. Диагностика трансформаторов Электроставода // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы: материалы междунар.

науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Виктора Соколова. – Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. – С. 102 – 105.

2. **Боднар, В.В.** Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В.В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.

3. **Сви, П.М.** Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

4. **Карвовский, Г.А.** Электрооборудование и окружающая среда: Выбор и защита / Г.А. Карвовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.

5. **Ранжирование** состаренного парка силовых трансформаторов по техническому состоянию / В.В. Соколов // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: материалы совместного заседания совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при УРЦОТ и секции «Техническое обслуживание, мониторинг и диагностика электрооборудования» Четвертой Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГТУ, 2006.

6. **Построение** математической модели надежности трансформаторных подстанций 6 – 10/0,4 кВ / В.В. Сталович, В.Н. Радкевич // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. междунар. науч.-техн. конф.: сб. статей. – Т. 1. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 319 – 324.

*А.Г. Сабусов, студ.; рук. И.А. Баженов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИТТ 330 – 750 кВ

По состоянию на сегодняшний день принципиально существуют 3 концептуальных направления конструкции ИТТ:

1) Масляные. Трансформаторы тока серии «ТФРМ» наружной установки применяются в открытых распределительных устройствах, предназначенных для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам и устройствам защиты и управления в установках переменного тока напряжением 330, 500 и 750 кВ частотой 50 Гц.

По данным на 2011 год общее количество трансформаторов тока примерно 110 тыс. штук, преимущественно масляного типа. Все установленные трансформаторы тока с большим объемом масла. Наряду с ними существуют разработки маломасляных ТТ, например АГУ КВК. В перспективе – замена традиционных масляных трансформаторов тока на маломасляные и элегазовые с обмоткой повышенной точности, в целях АИИС КУЭ.

2) Газовые. ТГФ-330 трансформатор тока элегазовый. Элегазовый трансформатор тока «ТГФ 330» предназначен для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам и устройствам за-

щиты и управления в сетях переменного тока частотой 50 и 60 Гц напряжением 330 кВ.

3) Оптические трансформаторы. В последние 10 лет в мире стал активно развиваться новый вид измерительных приборов – так называемые оптические, или оптоволоконные, трансформаторы напряжения и тока, в основе действия которых лежат эффекты Поккельса и Фарадея. Подобные трансформаторы производит несколько зарубежных фирм, к примеру, NXPPhase, ABB, DynAmp и др. В последнее время аналогичные разработки появились и в России. Их ведут ФГУП «Всероссийский электротехнический институт», ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ЗАО «Электро». А российская компания ЗАО «Профотек» уже разворачивает производство волоконно-оптических преобразователей тока и напряжения.

Толчком к поискам новой технологии производства измерительных трансформаторов стали слабые места традиционных аппаратов. Благодаря новому принципу работы оптические трансформаторы имеют более высокий класс точности измерений и могут передавать цифровой сигнал неограниченному количеству принимающих устройств. Кроме того, технология позволяет совместить в одном аппарате измерители тока и напряжения. В числе основных преимуществ оптических трансформаторов также их низкие массогабаритные показатели, широкий динамический и частотный диапазон измерений, устойчивость к явлениям феррорезонанса, взрывопожаробезопасность и простота эксплуатации, обусловленные отсутствием масла и элегаза.

Как отметили в одном из своих докладов Михаил Ярмаркин, к.т.н., доцент Петербургского энергетического института повышения квалификации, и Александр Мокеев, директор ЗАО «Электро», этот новый класс изделий, использующий последние достижения в оптике, электронике и системах цифровой обработки и передачи сигналов, может получить широкий спектр применений. Так, уникальные свойства волоконно-оптических измерительных трансформаторов (компактность, небольшой вес, полная гальваническая развязка) позволяют использовать эти устройства на ОРУ 110 – 750 кВ, в мобильных передвижных метрологических лабораториях, прочих энергетических объектах. Применение оптических трансформаторов напряжения позволит облегчить (ускорить) создание систем АИИС КУЭ, т.к. они имеют не только аналоговые, но и цифровые интерфейсы, которые полностью совместимы с существующими (и проектируемыми) системами АИИС КУЭ.

Спрос на масляные ТТ на рынке электроэнергетики постоянно растет, что связано со значительным улучшением их характеристик. Совре-

менные маломасляные ИТТ стали взрывобезопасными, хорошо работают при низких температурах, сравнительно недороги и дешевле в эксплуатации.

Регламентные испытания проводимые периодически в соответствии с «Нормами испытаний электрооборудования» в установленные сроки не позволяют своевременно выявить возникновение предаварийной ситуации. Дополнительно к этим испытаниям желательным было бы контролировать и коэффициент абсорбции, который четко характеризует степень увлажненности изоляции. А после постановки ТТ под рабочее напряжение для наиболее полной оценки его внутреннего технического состояния целесообразно контролировать наличие частичных разрядов и тепловизионный контроль. Основным предвестником возникновения предаварийной ситуации считается резкое изменение тангенса угла потерь и емкости изоляции, хотя по имеющимся данным по ряду действующих подстанций 500 кВ этого показателя явно недостаточно. В любом случае необходим оперативный контроль. В настоящее время для этой цели разработан прибор СТ-Relay. СТ-Relay – контроль состояния высоковольтных трансформаторов тока под рабочим напряжением; ТАНГЕНС-2000 измеритель тангенса угла диэлектрических потерь.

Библиографический список

1. **Анализ** эксплуатации трансформаторов тока ТФРМ 500Б / С.И. Марьянова, И.А. Баженов // Энергетик. – 2013.

*А.С. Еремеев, студ., С.Н. Литвинов, инж.;
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Применение асинхронного электродвигателя (АД) в различных отраслях производства оправдано в первую очередь простотой его изготовления и эксплуатации, в сравнении с другими приводами. Так, статистика утверждает, что доля АД в общем парке машин составляет около 90 %, а по установленной мощности около 50 % [1]. Поэтому отказ АД может привести к нарушению технологического процесса с последующим браком продукции, затратами на восстановление и ремонт электропривода, а

также на восстановление нормальных технологических процессов. Повреждение двигателей собственных нужд электростанций может привести к останову блока и тем самым повлиять на устойчивость работы энергосистемы.

Таким образом, контроль состояния электродвигателя во время эксплуатации является необходимым мероприятием, предупреждающим возникновение и развитие аварийных ситуаций, а также нарушение технологического процесса. Одним из путей сокращения внеплановых простоев и повышения надежности оборудования является диагностика, контроль и прогнозирование наиболее встречаемых неисправностей АД в процессе эксплуатации.

Известно, что наибольшую долю отказов АД составляют неисправности обмоток статора, а именно витковые замыкания. Согласно [2] на долю витковых замыканий АД единой серии со вспятыми обмотками приходится 93 % поврежденных обмотки, тогда как повреждения междуфазной (5 %) и пазовой (2 %) изоляции обычно возникают как следствие витковых замыканий.

Витковое замыкание – дефект изоляции обмотки электродвигателя, при котором по короткозамкнутым виткам протекают токи прямой обратной и нулевой последовательности.

Дифференциальные защиты по принципу действия не реагируют на витковые замыкания, а чувствительность токовых защит даже к междуфазным коротким замыканиям недостаточна, поскольку они охватывают повреждения в пределах 6...20 % обмотки от линейных выводов. Повышенной чувствительностью к витковым замыканиям обладает токовая фильтровая защита обратной последовательности, однако она реагирует на замыкание порядка 10...20 % витков фазы и действует с выдержкой времени, необходимой для согласования смежных защит [3]. Дальнейшее повышение чувствительности последней защиты ограничено естественной асимметрией токов сети, составляющей 10...15 %, а наличие выдержки времени снижает эффект достигнутой повышенной чувствительности, поскольку к моменту отключения витковое замыкание может перерасти в междуфазное короткое замыкание.

В настоящее время существует множество подходов к построению систем технического диагностирования данной неисправности АД:

1. Максимальная токовая фильтровая защита, реагирующая на несимметрию фазных токов статора электродвигателя.
2. Защита, основанная на анализе вибрационных и акустических процессов.
3. Метод, основанный на анализе тепловых процессов протекающих в обмотке статора.

4. Метод, основанный на контроле симметрии фазных токов по величине и начальной фазе.

5. Метод, основанный на анализе параметров внешнего магнитного поля.

6. Метод В.В. Бурькина (ИГЭУ), который основан на использовании защиты, реагирующей на появления напряжения нулевой последовательности в обмотке, расположенной на кольцевом магнитопроводе в корпусе двигателя [4].

Несмотря на очевидную перспективу использования внешнего магнитного поля машины в качестве источника диагностического сигнала, из всех перечисленных методов диагностирования наиболее высокую чувствительность к витковым замыканиям в обмотке статора и отстройку от внешних замыканий имеет метод, примененный в разработке устройства диагностики витковых замыканий кафедры ЭСПиДЭ Ивановского государственного энергетического университета [4].

Анализируя физические процессы, протекающие в двигателе при ВЗ, обнаружили, что в линейных токах составляющая нулевой последовательности отсутствует, т.к нет пути замыкания I_0 через землю. Ток нулевой последовательности замыкается только в короткозамкнутых витках. Поэтому для выделения тока нулевой последовательности рациональнее использовать его естественный контур протекания. То есть установить в лобовых частях обмотки статора замкнутый кольцевой магнитопровод с вторичной обмоткой, к которой подключен реагирующий на появление напряжение орган. Первичными обмотками для магнитопровода являются охватывающие его лобовые части.

При отсутствии повреждения в обмотке статора токи прямой и обратной последовательностей, протекающие по лобовым частям, взаимно компенсируются относительно магнитопровода. Их результирующая намагничивающая сила равна нулю. При возникновении замыкания в короткозамкнутых витках обмотки статора циркулирует ток нулевой последовательности. Так как витки охватывают кольцевой магнитопровод, в нем создается поток нулевой последовательности. При его возникновении во вторичной обмотке магнитопровода защиты наводится ЭДС, пропорциональная величине намагничивающей силы. Напряжение на выводах вторичной обмотки магнитопровода защиты свидетельствует о наличии витковых замыканий в обмотке статора электродвигателя.

Токи нулевой последовательности возникают в линейных токах электродвигателя при наличии замыкания на землю. В [4] показано, что как при внешнем (вблизи выводов), так и при внутреннем (внутри обмотки, на различном электрическом удалении от выводов в сторону нейтра-

ли) замыканиях на землю значение намагничивающей силы нулевой последовательности для магнитопровода защиты невелико. Оно значительно меньше аналогичного значения, возникающего при витковых замыканиях. Тем самым достигается необходимая чувствительность защиты и уровень отстройки её от случаев замыканий на землю.

Вывод

На сегодняшний день существует только одно устройство, обладающее высокой чувствительностью к ВЗ (способное определить даже ВЗ одного витка). Но данное устройство требует установки внутри машины.

Библиографический список

1. **Копылов, И.П.** Электрические машины: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2000. – 607 с.
2. **Методика** расчета надежности витковой изоляции обмоток асинхронных двигателей в период приработки / А.С. Гитман [и др.] // Изв. Томского политехнического института. – 1968. – Т. 190. – С. 60 – 63.
3. **Гимоян, Г.Г.** Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – М.: Недра, 1978.
4. **Савельев, В.А.** Исследование защиты электродвигателя от витковых замыканий / В.А. Савельев, В.В. Бурькин // Электромеханика: изв. вузов. – 1985. – № 7. – С. 88 – 93.
5. **Калачева, О.Н.** Диагностика витковых замыканий в обмотке статора асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором: метод. указ. / О.Н. Калачева, В.В. Бурькин; под ред. В.А. Савельева. – Иваново, 2005.

*Н.С. Васильченко, студ.; рук. И.Н. Сульненков
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИЗМЕНЕНИЕ ПОДХОДА К ВЫБОРУ СХЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ГЭС

В соответствии с требованиями Норм технологического проектирования (НТП) ГЭС и ГАЭС для открытых распределительных устройств (РУ) различных классов напряжений рекомендуются к применению схемы, приведенные в табл. 1 [1]. В то же время статистика использования этих схем представлена в табл. 2 [2]. Исходя из этого, можно сделать вывод, что ряд рекомендованных схем либо не применяются, либо имеют ограниченную зону использования. Следуют также отметить, что НТП не пересматривались с 1986 года. За это время появилось современное

высоконадежное оборудование, появились современные средства технической диагностики, что привело к повышению функциональной надежности оборудования, а значит и к повышению надежности схем РУ в целом. Эти факторы приводят к изменению зон применения различных схем РУ и возможности расширения типовой сетки схем.

Таблица 1. Схемы РУ ГЭС, рекомендуемые к применению, в соответствии с НТП ГЭС и ГАЭС

Схема	Класс напряжений, кВ			
	110	220	330	500
Одиночный мостик	+	+	–	–
Сдвоенный мостик	+	–	–	–
Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин, с отдельными секционным и обходным выключателями (от 7 до 10 присоединений)	+	+	–	–
Две рабочие и обходная системы шин (от 8 до 15 присоединений)	+	+	–	–
Две рабочие секционированные выключателями и обходная системы шин с двумя шиносоединительными и двумя обходными выключателями (более 15 присоединений)	+	+	–	–
Четырехугольник	–	+	+	+
С двумя системами шин с жестким присоединением блоков к ним с присоединением линий к шинам через два выключателя	–	–	+	+
Шестиугольник	–	–	+	+
4/3	–	–	+	+
3/2	–	–	+	+
4/3 и 3/2 с жестким присоединением автотрансформаторов к сборным шинам	–	–	+	+

Таблица 2. Статистика применения схем РУ ГЭС

Схема	Схемы РУ ГЭС и ГАЭС			
	Частота применения при напряжении, кВ			
	110 (150)	220	330	500
13Н	80 %	50 %	–	–
Схема 2/1	20 %	7,7 %	–	16,7 %
Схема 3/2	–	7,7 %	–	41,7 %
Схема 4/3	–	–	20 %	25 %
Многоугольники	–	30,7 %	80 %	8,3 %
15	–	3,9 %	–	8,3 %

В Федеральной сетевой компании разработаны рекомендации [3] по применению схем РУ для подстанций, в основе которых лежит детерминированный критерий «n-i». Аналогичная работа произведена для открытых РУ ГЭС, с учетом требований по надежности изложенных в НТП ГЭС и ГАЭС и минимума капитальных вложений.

Разработан алгоритм выбора схемы РУ, согласно которому, в зависимости от различного количества присоединений, числа генераторов, наличия ограничений по резервной мощности системы, наличию генераторных выключателей и проходных воздушных линий электропередач, количества ячеек РУ, предлагается к выбору наиболее оптимальная схема. В соответствии с этим алгоритмом на рис. 1 представлена диаграмма, определяющая зоны применения различных схем.

При составлении алгоритма выбора схем РУ и диаграммы зон их применения приняты следующие допущения:

1. С целью недопущения каскадного развития аварии, число присоединений, подключенных к системе или секции шин, не может превышать четырех, без учета шиносоединительных и секционных выключателей. При увеличении числа присоединений используется секционирование шин. При этом в название схемы добавлена одна буква «с», в случае секционирования одной системы или секции шин, и две буквы «с» – при секционировании обеих систем или секций шин.

2. Не рассматриваются варианты схем с подключением более двух генераторов к рабочей системе или секции шин из-за большой потери мощности в системе при отказе самих шин или коммутирующих эти шины выключателей.

3. Не рассматриваются ремонтные состояния схемы из-за высокой надежности современных элегазовых и вакуумных выключателей и низкой частоты их ремонта.

По результатам проделанной работы выполнен сравнительный анализ. Выявлен ряд новых схем для РУ ГЭС, ранее не рассматриваемых в НТП ГЭС и ГАЭС, что позволило расширить возможности по проектированию гидроэлектрических станций.

К списку допустимых схем добавились: два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии, одна рабочая секционированная выключателем система шин с секционированием секций шин, две рабочие и обходная системы шин с секционированием систем шин, трансформаторы (автотрансформаторы) шины с полуторным присоединением линий, одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через «полуторную» цепочку, одна рабочая система шин с подключением ответственных присоединений через «полуторную» цепочку, трансформаторы (автотрансформаторы) шины дважды секционированные с полуторным присоединением линий, «полуторная схема» дважды секционированная, схема 4/3 с жестким присоединением автотрансформаторов к сборным шинам.

	Есть проходные линии				Нет проходных линий				Условия
	Есть генераторный выключатель		Нет генераторного выключателя		Есть генераторный выключатель		Нет генераторного выключателя		
	$P_{\max \text{ rel}} > 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} < 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} > 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} < 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} > 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} < 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} > 2P_G$	$P_{\max \text{ rel}} < 2P_G$	
	5Н	7	5АН		4Н		4Н		
$n-1$	18		13		9		9		
$n-2$	8		8		9		9		
$n-3$	8	15с	8	15с	9	13Нс	9	13Нс	
$n-4$	20	-	20	-	9	9с	9	9с	
$n-5$	9Н	-	9Н	20с	9	9с	9	9с	
$n-6$	20	-	20	-	9	9с	9	9с	
$n-7$	9АН	16с	9АН	16с	9	9с	9	9с	
$n-8$	9АН	9АНс	9АН	9АНс	9	9с	9	9с	
$n-9$	19	-	19	-	9	9с	9	9с	
$n-10$	19	15с	19	15с	9	9с	9	9с	
$n-11$	16с	17с	16с	17с	9	9с	9	9с	
$n-12$	17	-	17	-	9	9с	9	9с	
$n-13$	17	20с	17	20с	9	9с	9	9с	
$n-14$	17	16с	17	16с	9	9с	9	9с	
$n-15$	17	17с	17	17с	9с	-	9с	-	
$n-16$	19	-	19	-	9с	9с	9с	9с	
$n-17$	19	20с	19	20с	9с	9с	9с	9с	
$n-18$	19	20с	19	20с	9с	9с	9с	9с	
$n-19$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-20$	19	-	19	-	9с	9с	9с	9с	
$n-21$	19	20с	19	20с	9с	9с	9с	9с	
$n-22$	19	20с	19	20с	9с	9с	9с	9с	
$n-23$	19	17с	19	17с	9с	-	9с	-	
$n-24$	19	19с	19	19с	9с	-	9с	-	
$n-25$	19	-	19	-	9с	9с	9с	9с	
$n-26$	19	9АНс	19	9АНс	9с	9с	9с	9с	
$n-27$	19	20с	19	20с	9с	9с	9с	9с	
$n-28$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-29$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-30$	19	-	19	-	9с	9с	9с	9с	
$n-31$	19	-	19	19АНс	9с	9с	9с	9с	
$n-32$	19	20с	19	20с	9с	9с	9с	9с	
$n-33$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-34$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-35$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-36$	19	9АНс	19	9АНс	9с	-	9с	-	
$n-37$	20с		20с		9с		9с		

Рис. 1. Зоны применения схем РУ ГЭС

Также был выявлен ряд схем, рекомендуемых ранее НТП ГЭС и ГАЭС, которые не удовлетворяют требованиям по конечному критерию – капитальные затраты. К этим схемам относятся: одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин, две рабочие и обходная системы шин, трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя, трансформаторы – шины с полуторным присоединением линий.

Таким образом, представленный алгоритм позволяет при проектировании определить оптимальный, с учетом допущений, вариант схемы РУ, наметить варианты схем для сравнения по величине затрат при числе присоединений более пяти или выбрать схему РУ без такого сравнения при малом числе присоединений.

Библиографический список

1. **Нормы** технологического проектирования гидроэлектрических и гидроаккумулирующих электростанций. – М.: Минэнерго СССР, 1986. – 120 с.
2. **Шунтов, А.В.** Методологические основы формирования схем выдачи мощности электростанций: дис. докт. техн. наук: 05.14.02 / Шунтов Андрей Вячеславович. – Москва, 2001. – 310 с.
3. **СТО 56947007-29.240.30.047-2010.** Рекомендации по применению типовых принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35 – 750 кВ. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 128 с.

*И.Н. Демьянова, студ.; рук. И.Н. Сулыненков
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Основным оборудованием распределительных устройств являются высоковольтные выключатели, разъединители, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, сборные шины и ошиновка. От надежности этих аппаратов зависит надежность обеспечения потребителей электрической энергией. Распределение отказов оборудования по элементам распределительных устройств (РУ) представлено на рис. 1 [1].

Примерно треть от общей частоты отказов оборудования РУ составляют высоковольтные выключатели. При этом отказы именно этих аппаратов приводят к наиболее тяжелым последствиям – двусторонним отказам [1].

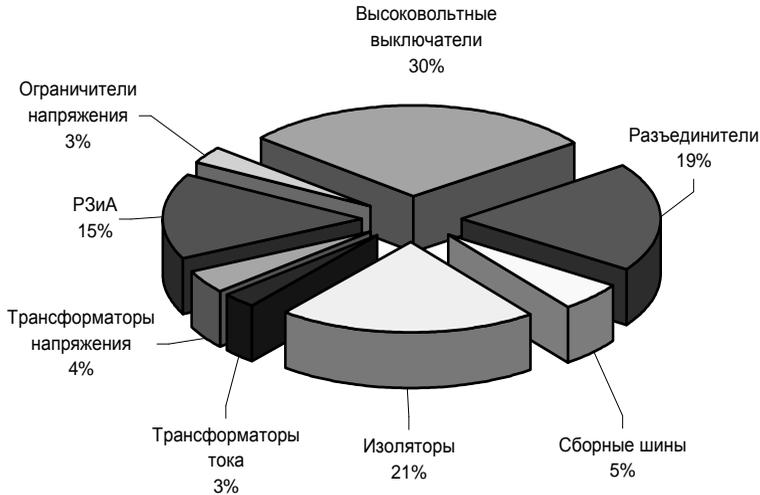


Рис. 1. Распределение технологических нарушений оборудования РУ по видам

С появлением современных высоконадежных элегазовых выключателей изменяются положения нормативных документов в части выбора схем РУ: применение упрощенных схем, отказ от ремонтных перемычек и обходных систем шин. Это связано с уменьшением частоты отказов и увеличением сроков проведения ремонтов. Однако, в ряде случаев такой подход является не совсем правильным.

Оценка надежности выключателей производится по частоте ремонтов и отказов. Более правильным подходом является сравнение по вероятностям нахождения элемента распределительного устройства в состоянии аварийного или планового ремонта.

В табл. 1 представлены статистические данные для различных видов выключателей по классам напряжения [2, 3]. На основании этих данных в табл. 2 произведены расчеты вероятностей нахождения выключателей в различных эксплуатационных состояниях в течении года. В сетях 220, 330, 500 кВ частота отказов элегазовых выключателей в 2,5 – 40 раз меньше чем у других выключателей. При этом время восстановления находится на уровне воздушных выключателей. Этим обусловлена на порядок меньшая вероятность нахождения этих выключателей в состоянии аварийного ремонта. Аналогичная ситуация наблюдается для вероятности нахождения в плановом ремонте и в ремонте в целом.

Таблица 1. Основные показатели надежности высоковольтных выключателей

Вид выключателя*	Класс напряжения, кВ	Параметры							
		оср, 1/год	оср, %	Тв, ч	Тв, %	мт, 1/год	мт, %	Тр, ч	Тр, %
ММ	35	0,2	1000,0	25	62,5%	0,14	70,0%	9	31,0%
МБ		0,01	50,0	30	75,0	0,14	7000,0	12	41,4
ВВ		0,02	100,0	40	100,0	0,2	100,0	29	100,0
ММ	110	0,6	3000,0	20	100,0	0,14	70,0	30	66,7
МБ		0,016	80,0	40	200,0	0,14	70,0	23	51,1
ВВ		0,02	100,0	20	100,0	0,2	100,0	45	100,0
ЭГ		0,005	25,0	129	645,0	0,07	35,0	56,1	124,7
МБ	220	0,02	80,0	70	46,7	0,3	100,0	120	48,0
ВВ		0,025	100,0	150	100,0	0,3	100,0	250	100,0
ЭГ		0,01	40,0	82,6	55,1	0,066	22,0	77,3	30,9
ВВ	330	0,03	100,0	60	100,0	0,2	100,0	113	100,0
ЭГ		0,007	23,3	18	30,0	0,08	40,0	29,6	26,2
В		0,15	100,0	60	100,0	0,2	100,0	133	100,0
ЭГ	500	0,004	2,7	82,6	137,7	0,066	33,0	77,3	58,1

* – ММ – маломасляные выключатели, МБ – масляные баковые выключатели, ВВ – воздушные выключатели, ЭГ – элегазовые выключатели

Таблица 2. Вероятности нахождения выключателей в различных эксплуатационных состояниях в течении года

Вид выключателя*	Класс напряжения, кВ	Вероятности нахождения в состоянии					
		Аварийного ремонта, о.е.	Аварийного ремонта, %	Аварийного ремонта, о.е.	Аварийного ремонта, %	Ремонта, о.е.	Ремонта, %
ММ	35	0,0005708	625,0	0,0001438	21,7	0,0007146	94,8
МБ		3,425E-05	37,5	0,0001918	29,0	0,000226	30,0
ВВ		9,132E-05	100,0	0,0006621	100,0	0,0007534	100,0
ММ	110	0,0013699	3000,0	0,0004795	46,7	0,0018493	172,3
МБ		7,306E-05	160,0	0,0003676	35,8	0,0004406	41,1
ВВ		4,566E-05	100,0	0,0010274	100,0	0,0010731	100,0
ЭГ		7,363E-05	161,3	0,0004483	43,6	0,0005219	48,6
МБ	220	0,0001598	37,3	0,0041096	48,0	0,0042694	47,5
ВВ		0,0004281	100,0	0,0085616	100,0	0,0089897	100,0
ЭГ		9,429E-05	22,0	0,0005824	6,8	0,0006767	7,5
В	330	0,0002055	100,0	0,0025799	100,0	0,0027854	100,0
ЭГ		1,438E-05	7,0	0,0002703	10,5	0,0002847	10,2
ВВ		0,0010274	100,0	0,0030365	100,0	0,0040639	100,0
ЭГ	500	3,772E-05	3,7	0,0005824	19,2	0,0006201	15,3

* – ММ – маломасляные выключатели, МБ – масляные баковые выключатели, ВВ – воздушные выключатели, ЭГ – элегазовые выключатели

Для напряжения 110 кВ, несмотря на наименьшую частоту отказов, элегазовые выключатели имеют высокую вероятность нахождения в аварийном ремонте – 161,3 % от воздушных. Это связано с увеличением времени восстановления выключателя до уровня 129 ч по отношению к 40 и 20 ч для воздушных и масляных выключателей соответственно. Вероятность нахождения в ремонте так же отличается в 2 раза от воздушных и находится на одном уровне с масляными баковыми выключателями. Поэтому для элегазовых выключателей этого класса напряжения необходимо учитывать ремонтные состояния, особенно для схем со сборными шинами.

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что ошибочно говорить о высокой надежности оборудования только исходя из частоты отказов и ремонтов, а ряд положений нормативных документов не применимы для всех классов напряжения.

Библиографический список

1. Сульиенков, И.Н. Совершенствование модели отказов выключателей / И.Н. Сульиенков, А.Н. Назарычев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики. – СПб.: Северная звезда, 2010. – С. 296 – 306.
2. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М: Энергоатомиздат, 1989.
3. О надежности ячеек элегазовых выключателей 110 – 750 кВ подстанций / Ю.А. Дементьев [и др.]. – Электрические станции. – 2011. – № 1.

*И.А. Ушанов; рук. И.А. Баженов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

КАБЕЛИ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Общая информация об испытаниях кабельных линий. В настоящее время нормальная работа систем электроснабжения невозможна без надежной работы силовых кабельных линий (КЛ) низкого и среднего классов напряжения. С начала 70-х годов прошлого века кабели с изоляцией из СПЭ активно заменяют кабели с бумажно-масляной изоляцией. Низкие величины относительной диэлектрической проницаемости, большой запас термической стойкости стали главной причиной, заставившей выбрать СПЭ, как изоляционный материал для кабелей среднего и высокого напряжения. Для обеспечения надежной работы силовых КЛ

в настоящее время в России применяется система планово-профилактических испытаний, при которой кабели периодически подвергаются испытаниям постоянным напряжением достаточно высокого уровня с измерением токов утечки. Практика показывает, что планово-профилактические испытания повышенным постоянным напряжением даже в случае их успешности не только не гарантируют безаварийную последующую работу КЛ, но и во многих случаях приводят к сокращению срока службы КЛ. Особенно опасны такие испытания для КЛ с длительными сроками эксплуатации или с сильно состаренной изоляцией. Кроме того, испытания повышенным постоянным напряжением силовых кабелей с изоляцией из СПЭ, которые находят все более широкое применение в России, не только практически бесполезны, так как шитый полиэтилен обладает высокой электрической прочностью и малыми токами утечки, но и оказывают негативное воздействие на полиэтиленовую изоляцию. Применительно к силовым кабелям с изоляцией из СПЭ гораздо более эффективным и экономичным является шадящий метод испытаний напряжением СНЧ 0,1 Гц, которое по величине не превышает более чем в 3 раза номинальное напряжение КЛ. Испытания при очень низких частотах со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции, что приводит к резкому уменьшению ресурса такого кабеля, в отличие от того, как это происходит при приложении постоянного напряжения. Поэтому за рубежом кабели с изоляцией из СПЭ испытываются исключительно напряжением СНЧ. При испытаниях силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией применение этого метода позволяет в значительной степени уменьшить испытательное напряжение по сравнению с испытаниями постоянным напряжением. Распределение постоянного напряжения по толщине электрической изоляции кабелей из СПЭ и пропитанной бумаги принципиально разное. За счет образования объемных зарядов у электродов на внутренней и наружной поверхностях изоляции из СПЭ образуется локальная концентрация электрического поля, которая может привести к разрушениям в виде скользящих разрядов и пробою в первую очередь кабельных муфт, являющихся более слабыми в электрическом отношении элементами КЛ. Такие случаи пробоя муфт неоднократно наблюдались при испытаниях КЛ на номинальное напряжение 10 – 35 кВ постоянным напряжением по нормам, предусмотренным в ПУЭ для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, где величина испытательного напряжения составляет $10,3 U_0$. В международных стандартах МЭК 60502-2, HD 620 для кабелей среднего напряжения с изоляцией из СПЭ рекомендуется испытание КЛ проводить переменным напряжением, в т.ч. пониженной частотой 0,1 Гц. В качестве альтер-

нативы допускается проводить испытания КЛ постоянным напряжением величиной $4 U_0$ в течении 15 минут (с характерным примечанием: «испытание напряжением постоянного тока может повредить испытываемую систему изоляции»). Таким образом, неправомерно переносить нормы испытаний КЛ постоянным напряжением для кабелей с пропитанной бумажкой изоляцией на кабели с изоляцией из СПЭ. Для СПЭ воздействие испытательного постоянного напряжения величиной до $10 U_0$ является *разрушающим*

Общие сведения о высоковольтных испытаниях СНЧ. Для испытания СПЭ-кабелей можно применять установки СНЧ. Такие испытания не влияют на состояние материала изоляции и кабель не теряет своих свойств. Установка СНЧ подает в кабель постоянное напряжение частотой 0,1 Гц. Испытание производится напряжением, равным $3 U_0$, согласно утвержденным отраслевым стандартам или 6Ун согласно российским требованиям. С помощью применения напряжения косинусо-прямоугольной формы дефектные места в кабелях с ПЭ, ПВХ а также с бумажно-масляной изоляцией быстро приводятся в состояние пробоя, без ненужной дополнительной нагрузки на кабельную изоляцию. Основной причиной увеличения уровня частичных разрядов при эксплуатации кабелей с изоляцией из СПЭ является рост водных триингов в изоляции. Технология создания кабельной изоляции из сшитого полиэтилена появилась в 70-х годах 20 века. Сшивка – создание пространственной решетки за счет образования продольно-поперечных связей между макромолекулами полимера – увеличивает жесткость изоляции при повышенных температурах. Эксплуатационные характеристики снижаются в следствие его старения и водных триингов. Различают два вида триингов: «бант» и «веер». Электрическая прочность изоляции в области триингов существенно снижается, что повышает напряженность на неповрежденной части изоляции и ускоряет процесс роста триинга. Лабораторные испытания прояснили механизм его образования и развития в изоляционных материалах, что позволило подобрать новые добавки, обеспечивающие высокую устойчивость СПЭ к образованию водных триингов. В настоящее время существуют две концепции снижения негативного влияния водных триингов на свойства изоляции: 1) в полиэтилен вводятся специальные химические добавки, в итоге получается триингостойкий сшитый полиэтилен – ТСПЭ; 2) создаются макромолекулы, в состав которых, помимо этилена, входит более 5 % других химических соединений, в итоге получается сополимерный сшитый полиэтилен.

Испытательные установки сверхнизкой частоты (СНЧ/PGT). На данный момент всё более актуальным становится вопрос испытания и

отыскания повреждений кабелей с изоляцией из СПЭ. Специфика данных кабелей заключается в том, что традиционные методы работы неприемлемы, поскольку ведут к формированию остаточных зарядов в оболочке кабеля и образованию древовидных пробоев изоляции. Всё это в результате приводит к раннему выходу из строя участков кабеля. Для испытаний изоляции таких кабелей используются СНЧ-установки, формирующие на выходе напряжение СНЧ. Изменение полярности испытательного напряжения позволяет избежать возникновения основной причины возникновения древовидных пробоев – остаточных зарядов оболочки.

Основными характеристиками приборов PGT являются:

- компактная конструкция;
- испытание с частотой 0,1 Hz без повреждения кабелей;
- автоматизированные процессы испытания.

PGT 20-V3,6. С помощью переносного прибора PGT 20-V3,6 можно проводить испытание кабелей среднего напряжения с экструдированной изоляцией и номинальным напряжением до 10/12 kV.

PGT 36-V2. С помощью переносного прибора PGT 36-V2 можно проводить испытание кабелей среднего напряжения с экструдированной изоляцией и номинальным напряжением до 12/20 kV. Испытания проводятся по методу сверхнизких частот (СНЧ), отличающемуся малыми нагрузками, с переменным напряжением до 36 kV и низкой частотой 0,1 Hz. С помощью этого прибора можно испытывать также кабели с бумажной пропитанной изоляцией.

Особенности систем PGT являются:

- компактный переносной прибор для испытания кабелей напряжением 20 kV по методу СНЧ;
- может переноситься одним или двумя людьми;
- простота управления;
- управление с помощью меню на немецком/английском языках, опционально: многоязычное меню;
- полностью автоматический процесс испытания;
- таймер с автоматическим отключением;
- распознавания пробоя;
- регистрации времени повреждения;
- непосредственное точное измерение величин высокого напряжения;
- предохранительный выключатель для защиты от замыкания на землю;
- опция: измерение тока утечки во время испытания по методу СНЧ.

Библиографический список

1. forca.ru.

*Е.А. Дятлова, студ.; рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ РЕТРОФИТА ИЛИ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ РУ-10 КВ ОАО «АВТОВАЗ»

• ОАО «АвтоВАЗ» является крупнейшим в России автопроизводителем и компанией, активно работающей в 46 странах. АвтоВАЗ – неотъемлемая составляющая экономики страны, Приволжского федерального округа и Самарской области.

• Основой развития техники в автомобилестроение является электрификация. Поэтому стабильная работа завода невозможна без надежного функционирования системы электроснабжения и распределения электроэнергии, устойчивой работы электрооборудования.

Одним из факторов, способных реально повысить эффективность эксплуатации электрооборудования, являются новые прогрессивные возможности – это установка вакуумных выключателей взамен морально устаревших и физически изношенных масляных выключателей напряжением 10 кВ.

Основными результатами влияния указанных факторов являются повышение производительности труда, снижение издержек на эксплуатацию и содержание электрооборудования, стабилизация режимов функционирования предприятия, производств, цехов, участков, оптимизация основных показателей цехов.

• Структурная схема системы электроснабжения ОАО «АвтоВАЗ»: это 7 главных понижающих подстанций с номинальным напряжением 110/10 кВ; 32 распределительных пунктов номинальным напряжением 10 кВ; масляные выключатели типа ВМПЭ-10 с встроенным приводом 1970 года выпуска.

• Основными потребителями и преобразователями электроэнергии являются высоковольтные двигатели 10 кВ, низковольтные двигатели 0,4 кВ, печи плавильные, сварочное производство, трансформаторы 10/0,4 кВ и освещение.

• Основными причинами выхода из строя масляных выключателей являются [1]:

- неисправности контактных систем – 18 %;
- перекрытия внутренней и внешней изоляции, поломка изолирующих частей – 14 %;
- отказы передаточных механизмов и приводов – 26 %;
- отказ в цепях управления – 42 %.

Необходимость реализации проекта применения ретрофита или нового строительства при модернизации РУ-10кВ ОАО «АвтоВАЗ» обусловлена физическим износом и моральным устареванием коммутационных аппаратов. Физический износ помимо затрат на проведение плановых ремонтов выключателей на объекте инвестирования является также причиной высокой аварийности масляных выключателей и соответственно затрат на устранение последствий аварий, вызванных отказами. К таким авариям можно отнести «выгорание» ячеек КРУ с повреждением всего находящегося в ячейке оборудования, включая и сам масляный выключатель, повреждение кабельных разделок и коммутируемого выключателями оборудования (электродвигатели, являющиеся приводами технологических механизмов, насосов, трансформаторы СН и пр.), стоимость которого на порядки выше стоимости выключателя. Еще одной причиной целесообразности реализации проекта на настоящем этапе является тот факт, что вышеперечисленные типы оборудования, эксплуатирующиеся на объектах, уже в течение многих лет сняты с производства их заводами-изготовителями, соответственно, имеется дефицит запасных частей для их ремонта.

В качестве вариантов реализации проекта будут рассмотрены следующие предложения:

1. Замена масляных выключателей на вакуумные в существующих ячейках КРУ с сохранением металлоконструкций ячеек, принципиальных схем главных цепей и заменой устройств релейной защиты и автоматики.

2. Полная замена ячеек на современные конструктивы (ячейки типа КРУ или типа КСО) с применением вакуумных выключателей, аналогичные по габаритным и присоединительным размерам для сохранения существующей схемы электроснабжения.

Ретрофит на базе вакуумного выключателя. Это один из самых массовых аппаратов находящихся на рынке эксплуатации.

Существует множество вариантов различных конструкторских решений с использованием данного оборудования по модернизации ячейки КРУ или КСО.

Для более четкого представления выгоды от использования ретрофита рассматривались особенности монтажа и рассчитывались значения следующих технико-экономических показателей:

- капитальные затраты на приобретение оборудования (закупочную стоимость оборудования с учетом его доставки на объект монтажа : ячейки КРУ, КСО),
- затраты по монтажу и наладке (затраты на строительно-монтажные и пусконаладочные работы),
- эксплуатационные показатели.

После сравнения полученных результатов стало видно, что оптимальным решением вопроса о модернизации ячеек КРУ 10 кВ ОАО «АвтоВАЗ» является замена выкатных элементов на базе вакуумного выключателя с учетом сохранения существующей схемы релейной защиты. В таком случае достигается максимальный экономический эффект от реконструкции. В доказательство этому покажем кратность затрат потребителя при внедрении разных вариантов, в % относительно ретрофита с вакуумным выключателем (100 %):

- КР-10/500 с выключателем ВМПЭ-10 – 103,4 %;
- Ячейка КРУ на базе выключателя «Таврида Электрик» – 346,7 %.

Библиографический список

1. **Руководство** по эксплуатации вакуумных выключателей ВВ/TEL-10. –Таврида Электрик, 2013. – 56 с.

*М.В. Наливайко, студ.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АСУТП ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ ПТК КВИНТ

АСУ ТП теплоэлектростанций (ТЭС) предназначена для решения задач производственно-технологического и оперативно-диспетчерского управления теплоэлектростанции, распределением и отпуском электроэнергии и тепла потребителям.

Организация системы контроля и управления электрической части ТЭС. Автоматизация электростанций осуществляется на базе микропроцессорных систем управления, архитектура которых строится на принципах распределенности, модульности, магистральности и открытости. Открытость предполагает использование стандартных интерфейсов, протоколов обмена данными в сети, инструментальных программных средств для настройки модулей системы управления, стандартных систем управления базами данных, а также информационную совместимость с другими системами управления (в частности, обмен информацией между системами управления электротехническим и теплотехническим оборудованием).

Система контроля и управления электротехническим оборудованием (СКУ ЭТО) ТЭС должна охватывать:

- турбогенераторы с системами возбуждения;
- трансформаторы собственных нужд;
- блочные трансформаторы и трансформаторы связи;
- электродвигатели собственных нужд;
- распределительные устройства;
- воздушные и кабельные линии;
- системы оперативного переменного и постоянного тока.

СКУ ЭТО включает следующие функциональные подсистемы контроля и управления элементов главной электрической схемы и собственных нужд:

- информационную подсистему;
- подсистему учета электроэнергии;
- подсистему диагностики оборудования;
- подсистему защиты, управления и регулирования.

Такое разделение СКУ ЭТО на функциональные подсистемы обусловлено следующими причинами:

- Аналогией с существующими подсистемами СКУ на традиционных средствах.
- Этапностью внедрения.
- Техническими требованиями, предъявляемыми к каждой подсистеме.
- Автономностью функционирования.

Информационная подсистема осуществляет сбор и первичную обработку информации о состоянии электротехнического оборудования в нормальном и аварийном режимах. Класс точности измерений в нормальном режиме должен быть не хуже 1 %, а в аварийном не хуже 3 % (весь измерительный канал: от датчика до отображения параметра). Аналоги существующих СКУ ЭТО щитовые приборы, по которым оперативный персонал ведет режим, светолучевые осциллографы (магнитографы), а также лампы положения коммутационных аппаратов на панелях управления оборудованием.

При аварийных режимах ввод информации по каждому измерительному каналу должен осуществляться с дискретностью порядка 1 мс, в нормальном режиме дискретность ввода параметров на уровне 0,5 – 1 с.

Подсистема учета электроэнергии обеспечивает учет электроэнергии, вырабатываемой ТЭС и ее расходования на собственные нужды. Данные подсистемы используются для расчета технико-экономических показателей (ТЭП) работы станции и должны передаваться по каналам связи в Энергосбыт и в диспетчерскую службу. Подсистема учета электроэнергии должна удовлетворять существующим требованиям, предъявляемым к автоматизированным системам контроля и управления по-

треблением и сбытом электроэнергии (АСКУЭ). Программные средства должны реализовывать задачи, традиционно решаемые средствами АСКУЭ (градация по группам, расчет получасовых мощностей, накопление данных по электроэнергии в различных временных интервалах, расчет баланса мощности и энергии и т.п.).

Подсистема диагностики оборудования определяет его ресурс, выявляет тенденции ухудшения эксплуатационных параметров технологического оборудования для его своевременной выдачи в ремонт. Она включает в себя подсистему сбора данных и экспертную подсистему. Ввод электрических параметров и параметров вибрации оборудования ТЭС должен производиться с дискретностью не более 1 мс. Ввод неэлектрических параметров может производиться с частотой не более 1 Гц. Экспертная система предупреждает о возможных отказах оборудования и моделирует режимы его работы. Она должна производить оценку состояния оборудования на основе статистической обработки данных реального времени на временных интервалах, характерных для задач диагностики конкретного оборудования.

Подсистема защиты, управления и регулирования выполняет функции релейной защиты и электроавтоматики и обеспечивает дистанционное управление непосредственно воздействуя на энергетическое оборудование (генератор, трансформатор и т.д.). К ней предъявляются повышенные требования надежности и быстродействия. Все команды управления распределяются по приоритетам:

- число аналоговых измерений до 20000;
- разрядность измерений 11 + знак;
- дискретность измерений, предназначенных для регистрации аварийных процессов, не более 1 мс;
- привязка измерений к системному времени не хуже 2 мс;
- число дискретных сигналов до 50000;
- привязка сигналов ко времени не хуже 5 мс;
- число измерений, выводимых на диспетчерский щит, до 500;
- число сигналов, отображаемых на диспетчерском щите, до 1000;
- синхронизация времени системы контроля и управления (всех подсистем, входящих в ее состав) – не хуже 10 мс;
- задержка от момента возникновения события до его предоставления оперативному персоналу не должна превышать 1 с.

В настоящее время на многих станциях ведутся работы по замене старого оборудования на новые программно технические комплексы (ПТК), например, Квинт. Управление и контроль за работой оборудования энергоблоков осуществляется с блочных щитов управления, куда вынесены приборы регулирования работы основного и вспомогательного

оборудования, а также аппаратура, необходимая для пуска и останова энергоблока.. Координация работы энергоблоков, а также управление оборудованием подстанций и линий электропередачи выполняется с центрального щита управления.

Основное назначение ПТК «Квинт»: автоматизация производственных процессов. Области применения Квинта: тепловые и атомные электростанции, газотурбинные установки, химические и металлургические комбинаты, цементные и стекольные производства и т.п.

ПТК «Квинт» ориентирован на выполнение следующих функций:

- информационных;
- управляющих;
- вспомогательных и сервисных;
- автоматизацию проектирования АСУ ТП;
- информационная связь с резидентными ПТК.

При разработке ПТК в основу его концепции были заложены следующие принципы:

- принцип распределенного управления: общая задача управления разбивается на участки, обслуживаемые отдельными многофункциональными программируемыми контроллерами, связанными между собой последовательным цифровым каналом;

- принцип избирательного централизованного контроля: вся требуемая информация представляется оператору на экране одной или нескольких операторских станций, связанных с контроллерами последовательными цифровыми каналами передачи информации;

- принцип централизованной подготовки базы данных и ее децентрализованного использования, что обеспечивает с одной стороны единство базы данных, с другой – живучесть системы управления;

- принцип технологического программирования: при подготовке, отладке и модификации технологических программ контроллеров не требуются знания в области формальных методов программирования, в то время как само свойство программируемости сохраняется. Это позволяет использовать ПТК «Квинт» для автоматизации самых разнообразных технологических процессов;

- принцип объектной ориентируемости, облегчающий проектирование, отладку и модернизацию АСУ ТП на базе ПТК «Квинт»;

- принцип масштабируемости (проектной компоновки аппаратуры ПТК «Квинт» и возможности наращивать ее количества), благодаря которому можно минимизировать затраты вне зависимости от масштаба АСУ ТП;

- принцип проектируемой надежности: заказчик сам может выбрать оптимальное для его целей соотношение надежность/стоимость.

*М.С. Груздова, студ.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основной задачей эксплуатации трансформаторов является обеспечение нормативного срока службы, который равен установленному стандарту (для силовых распределительных трансформаторов – 30 лет по ГОСТ Р 52719-2007). Эффективным средством повышения надежности работы силовых трансформаторов является применение современных методов и средств оперативной диагностики. Их внедрение обеспечивает эксплуатационный персонал информацией: о текущем техническом состоянии, о причинах и дефектах, об остаточном (на данный момент времени) ресурсе работы, т.е. как долго они могут безаварийно эксплуатироваться при выявленных и развивающихся дефектах; об оптимальных сроках проведения ремонтов, то есть работ для поддержания его безаварийной эксплуатации.

Для определения текущего технического состояния трансформаторов применяются системы мониторинга (СМ).

Система мониторинга предназначена для:

- непрерывного измерения, регистрации и отображения основных параметров трансформаторов классов напряжения 110 – 750 кВ в нормальных, предаварийных и аварийных режимах;
- оценки и прогнозирования технического состояния трансформаторов мощностью от 167 МВА.

Функции системы мониторинга

СМ должна реализовывать следующие функции:

- прямое измерение и контроль диагностических параметров;
- определение диагностических параметров по расчетно-аналитическим моделям по НТД ОАО «ФСК ЕЭС».

Для трансформаторов мощностью от 40 до 250 МВА, системы мониторинга должны контролироваться: температура масла, наружная температура, температура обмоток, токи высшего и низшего напряжения, уровень масла в расширителе, влаго- и газосодержание в масле, положение и крутящий момент РПН, контроль системы охлаждения. Производить расчёт: наиболее нагретой точки, влажности изоляции и оставшегося срока службы. Все эти параметры должны отслеживаться в режиме on-line, либо используя интерфейс установленный на самом трансформаторе. В современных системах мониторинга вся входная информация

храниться в архиве, что позволяет анализировать работу трансформатора за длительный период (за квартал, за год).

В настоящее время известно несколько зарубежных и отечественных разработок, поэтому возникает необходимость в анализе их возможностей и их соответствия требованиям сегодняшнему состоянию отечественной энергетики. В докладе сформулированы основные требования предъявляемые к системам мониторинга трансформаторов и проведён анализ известных разработок на их соответствие этим требованиям.

Библиографический список

1 **СТО 56947007-29.200.10.011-2008.** Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования / Утв. приказом ОАО «ФСК ЕЭС от 18.04.2008 № 140.

2. **Технологические** принципы мониторинга силовых трансформаторов / В.А. Савельев [и др.] // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. – Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надёжности либерализованных систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 82 – 90.

*М.А. Беликов, студ.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ КОМПАНИИ ALSTOM

Элегазовые колонковые выключатели 110 – 750 кВ

Преимущества:

- аналогичная дугогасительная камера для всей линейки выключателей;
- пружинный приводной механизм ФКЗ, включающий в себя пружину включения и отключения, обеспечивает высокую надёжность;
- прямое соединение пружинного приводного механизма с соединительной тягой обеспечивает быструю и простую установку;
- высокая механическая прочность и низкая вероятность повторного пробоа в соответствии с IEC 62271-100, класс M2 и C2.

Элегазовые баковые выключатели 110 – 500 кВ

Характеристики и признаки:

- компактный дизайн и высокая сейсмическая устойчивость;
- каждый полюс выключателя состоит из цельного литого алюминиевого бака с камерой для прерывателя и двух бушингов;
- система контроля плотности элегаза SF₆;

- защита от коррозии;
- шкаф привода включает пружинный механизм, электромотор и обогреватели, системы управления, сигнализации и защиты;
- выводы трансформаторов тока подсоединены к клеммникам, расположенным в отдельном отсеке шкафа привода;
- энергия привода запасается во взведенной пружине, поэтому в случае временной потери источника электроэнергии выключатель будет работать;
- в случае потери источника электроэнергии при помощи местных механических устройств выключатель может включаться и отключаться;
- в условиях эксплуатации выключатель практически не требует технического обслуживания.

Таблица 1. Характеристики и параметры модульной системы мониторинга выключателей CBWatch-2

Контролируемая характеристика	Параметры контроля
Элегаз	Контроль давления и температуры, вычисление плотности элегаза или смеси по алгоритму Beattie-Bridgeman
	Обнаружение утечки и выдача запрещающих сигналов в случае обнаружения утечек
	Вычисление интенсивности утечек и заблаговременное предупреждение о возможности появления предупреждающих и аварийных сигналов о снижении давления газа.
Механические операции	Контроль времени включения и отключения с использованием обычных блок-контактов или датчиков движения первичных контактов.
	Контроль скорости расхождения первичных контактов, демпфирования и хода контактов.
	Обнаружение механических дефектов (повышенное трение, коррозия, поломки, усталость пружин и дефекты демпферов).
	Контроль времени срабатывания блок-контактов
Пружинный привод	Контроль времени завода пружины
	Обнаружение дефектов двигателя и концевых выключателей
Коммутации	Замер тока во время коммутации
	Определение степени износа главных контактов
	Определение времени горения дуги
Вторичные цепи	Контроль целостности цепи катушек отключения, величины напряжения вторичных цепей, исправности нагревателя

Полупантографный горизонтальный разъединитель со складывающимся рычагом на напряжение от 362 до 800 кВ типа SPOL. Разъединитель SPOL является прочным и надежным аппаратом и может работать в самых неблагоприятных условиях. Он позволяет складывать секции ножей в вертикальной и горизонтальной плоскости и в разомкну-

том положении. Общая высота рычага в разомкнутом положении составляет лишь 60 % от продольного размера. Вследствие этого, поперечные конструкции и провода на подстанции могут располагаться более низко по сравнению с обычными вертикальными разъединителями. Центр тяжести находящейся под напряжением части намного ниже, чем у обычного вертикального разъединителя. Это обеспечивает более быстрое и плавное выполнение операций без отскока.

Вращающийся изолятор вызывает такое раскладывание ножа, что защищенный тюльпанообразный контакт поднимается при замыкании в строго горизонтальном направлении. При включении неподвижного контакта подвижный рычаг входит в направляющий раструб, а неподвижный контакт совмещается с подвижным контактом. Нож уравнивается так, что при срабатывании разъединителя преодолеваются только силы трения.

Настройка разъединителя не требует специальных инструментов, легко монтируется и регулируется.

Благодаря своим самосмазывающимся или смазываемым на весь срок службы частям и некоррозируемым материалам, SPOL фактически не требует техобслуживания.

Комбинированные трансформаторы тока и напряжения на напряжение 110 – 500 кВ

Преимущества:

- за счет уменьшения количества ячеек с измерительными трансформаторами уменьшается площадь электрической станции;
- стоимость комбинированного трансформатора на 30 % ниже, чем суммарная стоимость трансформатора тока и трансформатора напряжения.

Микропроцессорные терминалы защит

Многофункциональные, интеллектуальные терминалы серии MiCOM предназначены для защиты энергоустановок классов напряжений от 0,4 кВ до 750 кВ, а также распределительных сетей и сетей высокого и сверхвысокого напряжения. Помимо функций защиты, терминалы серии MiCOM реализуют функции управления, мониторинга технического состояния, регистрацию и осциллографирование аварийных событий, измерения в режиме реального времени и передачу информации в АСУТП по международным протоколам передачи информации МЭК-61850, -101, -103, MODBUS. Русифицированные интерфейсы (HMI) и программное обеспечение (MiCOM S1) позволяют обслуживающему персоналу параметризовать функции защит, изменять уставки, вести журнал событий и записанных осциллограмм для их дальнейшего анализа.

*И.Б. Авлоева, Р.Р. Киямов, студенты;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В современных условиях разработка методов оценки состояния и диагностирования измерительных трансформаторов напряжения (ТН) играет важное значение. Это объясняется тем, что с одной стороны растет их доля среди аппаратов отработавших нормативный срок службы и возникает проблема его продления, а продление срока службы на 20 – 30 лет дает большую выгоду, чем замена его на новое. С другой стороны рыночная конкуренция повышает требования к качеству электроснабжения потребителей и к надежности работы оборудования. Последние требования противоречат стремлению продления срока службы. Одним из главных путей поддержания эксплуатационной надежности в таких условиях является организация эффективного контроля состояния электрооборудования. На это и направлена данная работа.

В настоящее время для оценки состояния и в процессе диагностирования измерительных ТН определяют сопротивление изоляции первичных и вторичных обмоток, определяют коэффициент трансформации и группу соединения обмоток. Испытывают повышенным напряжением промышленной частоты, измеряют ток холостого хода и др.

Измерение сопротивления изоляции. Перед каждым измерением сопротивления изоляции обмотка трансформаторов должна быть заземлена не менее, чем на 2 минуты. Измерение сопротивления изоляции первичных обмоток ТН производится мегомметром на напряжение 2500 В. При этом сопротивления изоляции обмоток высокого напряжения, выводы вторичных обмоток (две и более) и корпус должны быть объединены, заземлены и подсоединены к выводу «←» мегомметра. Вывод моста « γ_x » подсоединяется к первичной обмотке (выводы «А» или «Х» для трансформаторов напряжения).

Сопротивление изоляции вторичных обмоток ТН измеряется мегомметрами на напряжение 1000 В и производится на каждой обмотке по отношению к корпусу и присоединенным к нему остальным обмоткам. Вывод мегомметра « γ_x » присоединяется к выводам проверяемой обмотки, а вывод мегомметра — к выводам остальных обмоток, соединенных с корпусом (цоколем) измерительного трансформатора и заземленных.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты 50 Гц. Создаёт в испытуемой изоляции высокую напряженность электрического поля, что позволяет обнаружить недопустимое снижение электрической прочности. Испытательное напряжение прикладывается поочередно к каждой обмотке ТН, остальные обмотки соединяются с корпусом трансформатора и заземляются.

Измерение тока холостого хода трансформаторов напряжения. При вводе ТН в эксплуатацию и в процессе работы измеряются потери ХХ. Для выявления витковых замыканий в обмотках, замыканий в элементах магнитопровода и замыканий магнитопровода на блок трансформатора. Измерения тока холостого хода производятся по схеме на полностью собранных каскадных трансформаторах напряжения (серии НКФ) подачей на вторичную обмотку ТН номинального напряжения данной обмотки. Значение номинального напряжения вторичной обмотки определяется типом ТН и выбирает – i по его паспортным данным.

Регулировочное устройство в схеме измерения тока ХХ должно быть рассчитано на длительное протекание тока более 30 А, а измерение должно производиться быстро, т.к. вторичная обмотка ТН не рассчитана на длительное прохождения больших токов.

В качестве такого устройства следует применять нагрузочные реостаты, т.к. применения в качестве регулирующих устройств автотрансформаторов происходит значительное искажение формы тока холостого хода и амперметр будет показывать заниженное значение.

При измерениях надо быть осторожным, так как на выводах первичной обмотки будет наводиться номинальное напряжение. Необходимо также следить, чтобы ток во вторичной обмотке не превышал значения, соответствующего по его максимальной мощности.

Проверка полярности выводов, группы соединения обмоток трансформаторов напряжения. Проверка полярности выводов и группы соединения ТН проводится подачей импульсов постоянного тока на одну из обмоток ТН по определенным схемам. В качестве источника постоянного тока используются аккумуляторные батареи на напряжение не более 12 В. В качестве прибора, подключаемого к обмотке низкого напряжения, используются милливольтметр.

Для проверки полярности выводов однофазных ТН зажимы «плюс» источника и прибора подключаются к одноименным выводам первичной и вторичной обмоток ТН соответственно. Одноименными выводами ТН являются выводы А-а и Х-х. При проверке ТН с соединением обмоток «звезда с нулем — звезда с нулем», зажимы «минус» батареи и прибора

подключаются к выводу нейтрали обмотки высокого и низкого напряжения соответственно. При проверке полярности выводов ТН, обмотки которых соединены в разомкнутый треугольник, «минус» источника тока подключается к выводу нейтрали обмотки высокого напряжения, а «плюс» – поочередно к выводам «А», «В», «С» обмотки высокого напряжения ТН. Зажим «плюс» гальванометра постоянно подключается к выводу «а». При указанном подключении источника тока и гальванометра и замыкании цепи стрелка будет отклоняться вправо. При проверке ТН со схемой соединения «звезда – звезда с нулем», зажим «плюс» источника тока подключается последовательно к выводам «А», «В», «С»; зажим «минус» – к выводам соответственно «В», «С», «А» обмотки высокого напряжения. Зажим «минус» гальванометра постоянно присоединен к выводу нейтрали обмотки низкого напряжения, а «плюс» поочередно подключается к выводам «а», «в» и «с» обмотки низкого напряжения.

Измерение коэффициента трансформации трансформаторов напряжения. Схемы измерений коэффициента трансформации трансформаторов напряжения показаны на рис. 4. Пределы измерений приборов (вольтметров) должны соответствовать значениям подаваемых на обмотки напряжений и иметь класс точности не менее 1.

Проверка коэффициента трансформации однофазных ТН выполняется подачей на первичную обмотку регулируемого напряжения измеряемого значения на выводах высокого и низкого напряжений.

Проверка коэффициента трансформации трехфазных ТН со схемой соединения обмоток «звезда с нулем – звезда с нулем» производится аналогично. Напряжение поочередно подается на вывод каждой фазы и нейтрали обмотки высокого напряжения и измеряются напряжения на выводах высокого и низкого напряжений этой фазы. При соединении обмоток ТН по схеме «звезда — звезда с нулем» напряжение подается и измеряется на соответствующих выводах обмоток высокого и низкого напряжений. Целесообразно подавать на выводы высокого напряжения симметричное трехфазное напряжение величиной до 380 В и измерять напряжения на одноименных выводах обмоток высокого и низкого напряжений. Однофазное напряжение подается поочередно на выводы нейтрали и одной из фаз обмотки высокого напряжения при закороченных обмотках других фаз высокого напряжения. При подаче на первичную обмотку трехфазного напряжения необходимо закоротить первичную обмотку одной из фаз. Измеренное напряжение на выводах «а_д – х_д» в этом случае будет в три раза больше, чем при измерении по однофазному напряжению.

*Д.А. Свирелин, студ.; А.В. Рассказчиков, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПАКТНОГО ЭЛЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

На данный момент компактное электротехническое оборудование с элегазовой изоляцией выполняется в двух конструктивных вариантах. К рассмотрению предоставляются PASS M0 фирмы ABB и KM-ОРУ-110 фирмы ЗЭТО на 110 кВ.

PASS M0 имеет модульную конструкцию, компактен и позволяет объединить в одном модуле силовой выключатель, один или несколько разъединителей и заземлителей, трансформаторы тока, вводы, подключаемые к одной или двум системам сборных шин.

Ячейка PASS M0 содержит все оборудование, необходимое для функционирования высоковольтного распределительного устройства наружной установки и позволяет реализовать любые схемы соединения и выполнить любую компоновку подстанции. Если для управления ячейкой PASS M0 используется электронный блок, то дополнительно может быть реализована функция измерения высокого напряжения. Все элементы ячейки, находящиеся под напряжением, заключены в заземляемый алюминиевый корпус, заполненный элегазом или смесью элегаза с азотом. Элементы каждой фазы находятся в отдельном корпусе.

На подстанциях, собранных из таких ячеек, отсутствуют традиционные сборные шины, так как они реализованы внутри ячейки.

Выключатель ячейки PASS M0 имеет одну дугогасительную камеру, действующую на основе хорошо отработанного принципа самопогашения дуги. Для отключения тока короткого замыкания используется энергия самой дуги, за счет чего мощность, потребляемая от приводного механизма, составляет примерно 50 % мощности, потребляемой традиционными выключателями.

PASS имеет все функции традиционного распределительного устройства с воздушной изоляцией на классы напряжения до 220 кВ в одном модуле, по размеру сопоставимом с традиционным выключателем на тот же класс напряжения.

Все эти особенности конструкции дают целый ряд существенных преимуществ:

- очень высокая надежность и доступность подстанции;
- значительное снижение времени на монтаж и наладку;
- значительное снижение требуемого пространства;
- упрощенная схема подстанции;

- минимальные эксплуатационные затраты;
- отсутствие влияния на окружающую среду: рециркуляция по окончании срока эксплуатации.

Таблица 1. Технические характеристики PASS M0

Технические характеристики	Норма
Минимальное напряжение, кВ	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	126
Номинальный ток, А	2500
Номинальная частота, Гц	50
Ток термической стойкости, кА	40
Ток электродинамической стойкости, кА	102
Номинальный ток отключения выключателя, кА	40
Испытательное напряжение грозового импульса 1,2/50 мкс, кВ:	
	- относительно земли
- между разомкнутыми контактами	630
Испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты, кВ:	
	- относительно земли
- между разомкнутыми контактами	265

PASS может быть реализован следующими типами распределительных устройств.

- с одной системой шин (SBB);
- с двумя системами шин (DBB);
- с двумя выключателями (DCB).

PASS может также использоваться как высоковольтная ячейка для мобильной подстанции, применяемая в качестве временного источника питания.

К основному недостатку можно отнести то, что такие распределительные устройства занимают несколько большую площадь, чем КРУЭ, но значительно дешевле. Для ремонта оборудования требуется отключить данное присоединение и секцию шин (рис. 1).

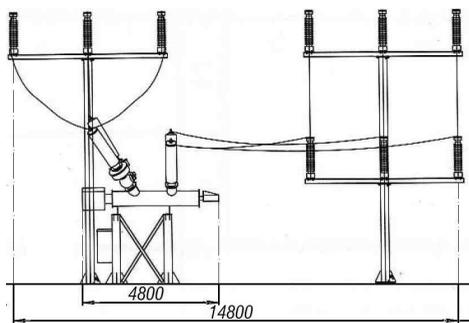


Рис. 1. PASS M0

КМ состоит из колонкового элегазового выключателя, измерительных трансформаторов, разъединителя шинного, разъединителя линейного (трансформаторного), элементов жесткой ошиновки с применением полимерных изоляторов типа ОСК-10-110 и опорных металлоконструкций. В качестве комплектующего оборудования по выбору могут применяться изделия любых производителей, присутствующих на российском рынке.

Сборные шины и межячейковые связи выполнены на базе жесткой ошиновки оригинальной разработки. Оборудование соединяется между собой жесткими или гибкими соединениями в зависимости от компоновки. Узлы крепления жестких соединений обеспечивают компенсацию температурных изменений длины шин.

Особенность конструкции – потолочный трехколонковый разъединитель РГ, не требующий обслуживания. Такое техническое решение значительно повышает эксплуатационную надежность модуля и позволяет создавать схемы ОРУ с двумя рабочими системами шин. Кроме того, регламентные и ремонтные работы на выключателе и трансформаторах тока можно проводить без погашения системы сборных шин в полном соответствии с требованиями по электробезопасности.

Базовый модуль может дополняться блоками заземления, измерения, ограничения перенапряжений, обработки ВЧ сигнала, и т.п. в зависимости от реализуемой схемы.

Опорные металлоконструкции блоков КМ ОРУ могут быть изготовлены для установки на фундаментах свайного или лежневого типа. Металлоконструкция собирается на объекте при помощи болтовых соединений. Конструкция опорных стоек позволяет устанавливать последовательно несколько блоков с общей металлоконструкцией, что позволяет при необходимости развития схемы расширять уже смонтированные блоки на месте без доработки.

Преимущества КМ-ОРУ-110:

- модули поступают полностью от одного поставщика (всё, кроме фундамента);
- сокращена величина площади ячейки ОРУ – до 45 % от общепринятой стандартной;
- уменьшено число фундаментов;
- все металлоконструкции имеют стойкое антикоррозийное покрытие горячим цинком;
- сокращено время на монтаж, конструкция компактная, легко собирается и быстро устанавливается;
- отсутствуют сварочные работы при монтаже;
- обеспечено удобство осмотра и обслуживания всех комплектующих;
- конструкция модуля позволяет заказчику использовать по выбору комплектующее оборудование любого производителя;

- возможность реализации разнообразных схемных решений комбинацией блоков и металлоконструкций КМ;
- использование типовых блоков и металлоконструкций КМ сокращает время проектных работ.

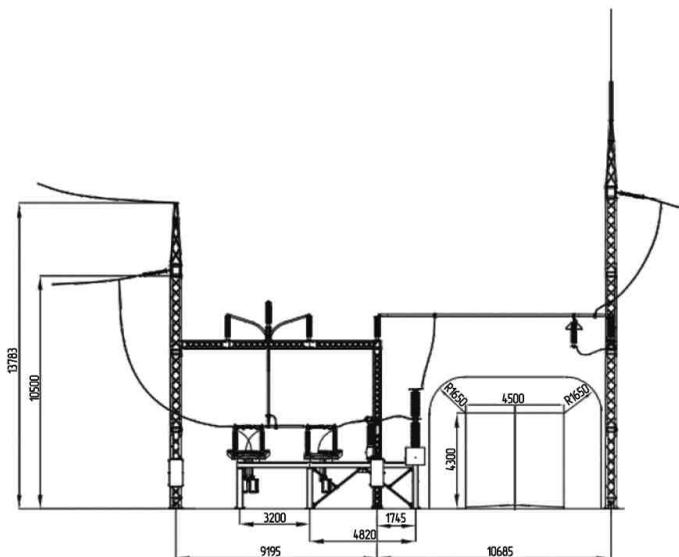


Рис. 2. КМ-ОРУ-110 по схеме мостик

Таблица 2. Технические характеристики КМ-ОРУ-110

Технические характеристики	Норма
Минимальное напряжение, кВ	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	126
Номинальный ток, А	2000
Номинальная частота, Гц	50
Ток термической стойкости, кА	40
Ток электродинамической стойкости, кА	100
Номинальный ток отключения выключателя, кА	40
Испытательное напряжение грозового импульса 1,2/50 мкс, кВ:	
- относительно земли	450
- между разомкнутыми контактами	570
Испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты, кВ:	
- относительно земли	230
- между разомкнутыми контактами	230

Как видно из приведённых данных, PASS M0 выигрывает у КМ-ОРУ-110 по техническим характеристикам и в компоновочном пла-

не, но российский компакт более надёжен и удобен в обслуживании, которое может производить ремонтный персонал.

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок / Министерство энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М., 2000.
5. **ГОСТ 12.1.038-2001.** Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновений. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
6. **Электрическая** часть станций и подстанций: учеб. для вузов / А.А. Васильев [и др.]; под ред. А.А. Васильева. – М.: Энергоиздат, 1990. – 576 с.
7. **Руководящие** указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций 3 – 750 кВ переменного тока – М.: Энергосеть проект, 1987.
8. **Компактные** распределительные устройства открытого типа 110 кВ КМ-ОРУ-110: каталог ЗЭТО.
9. **Комплектное** элегазовое распределительное устройство PASS M00, PASS M0, PASS M0S: каталог высоковольтного оборудования АВВ.

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

ЗАДАЧИ И ФУНКЦИИ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ 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, со-

провожающиеся 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 ф 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 отключаемой 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 устройствами 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.

*А.В. Шиков, студ.; рук. А.В. Рассказчиков, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ВАРИАНТОВ СХЕМ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ ТЭЦ

Схемы выдачи мощности ТЭЦ выполняются блочного типа и с использованием генераторного распределительного устройства (ГРУ). В соответствии с нормативными документами при величине местной нагрузки (МН) менее 30 % от мощности генератора рекомендуется применять блочный вариант схемы выдачи мощности. Это обосновывается технико-экономическими соображениями.

Важным показателем является надёжность схем, которая характеризуется бесперебойным электроснабжением потребителей и выдачей электроэнергии в систему [1].

Для сравнения двух видов схем выдачи мощности ТЭЦ производится анализ надёжности двух вариантов схем ТЭЦ с тремя установленными генераторами (рис. 1, 2).

Отказами схем выдачи мощности считаются полное (1) или частичное (2) нарушение электроснабжения местной нагрузки, а также отключение одного генератора (3), двух генераторов (4) или полное (5) прекращение выдачи мощности в энергосистему. Учитываются отказы одного из выключателей или одного из силовых трансформаторов. Случаи наложения отказов одного оборудования на ремонт другого оборудования не рассматриваются. При таких условиях отказы вида 1 и 5 в обеих схемах можно считать не возможными [2].

Для анализа надёжности вариантов схем выдачи мощности ТЭЦ по рис. 1 и 2 разработаны деревья отказов (рис. 3, 4, 5, 6).

В блочном варианте (рис. 1) погашение одного блока (отказ 3) возможно при отказе ТСН1, Т1 и выключателей В1 – В4 (рис. 3). При этом отключается только одна секция местной нагрузки, что не приводит к ограничению электроснабжения потребителей.

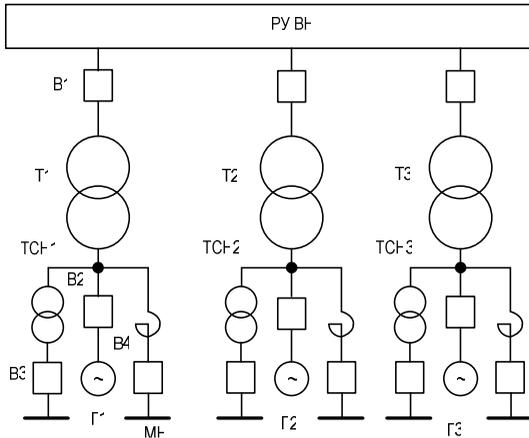


Рис. 1. Блочная схема выдачи мощности

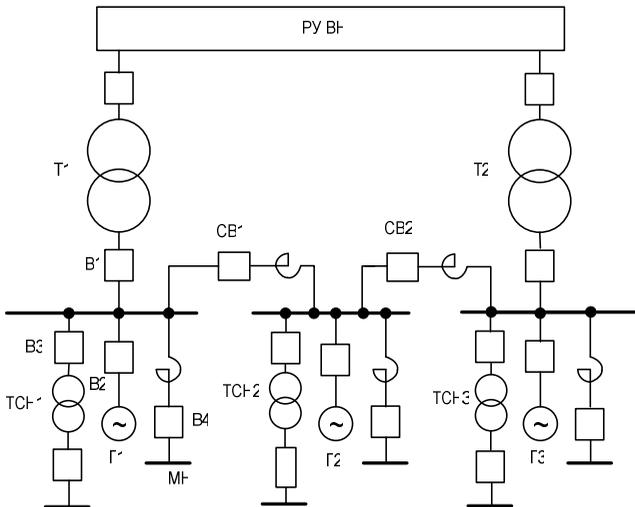


Рис. 2. Схема выдачи мощности с ГРУ

При отказе одного из секционных выключателей СВ1 или СВ2 (рис. 2) отключаются соответственно 1, 2 или 2, 3 секции ГРУ, что приводит к обесточиванию третьей части местной нагрузки (отказ 2, рис. 4).

Отключение одного генератора на ГРУ (отказ 3) происходит при отказе одного из выключателей В1 – В4, подключённых к ГРУ (рис. 5).

Отключение одновременно двух генераторов на ГРУ (отказ 4) происходит при отказе одного из секционных выключателей СВ1 или СВ2 (рис. 6).

На рис. 3 – 6 приведены схемы деревьев отказов для одного блока и одной секции ГРУ. Для построения полного дерева отказов необходимо соответственно нарастить разработанные схемы [1].

Блочная схема содержит события, возникающие при отказах блочных силовых трансформаторов. Ввиду высокой надёжности силовых трансформаторов вероятность отказа их небольшая. Следовательно, блочная схема имеет большую надёжность, чем схема с ГРУ, так как, как видно на рис. 3 – 6, нет отключения двух генераторов одновременно.

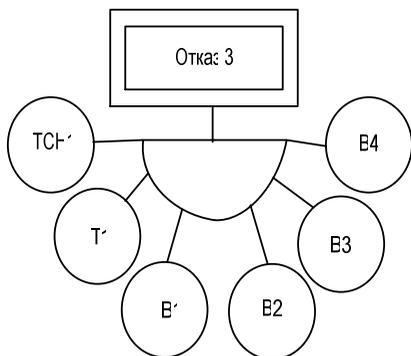


Рис. 3. Дерево отказа 3 для блочного варианта

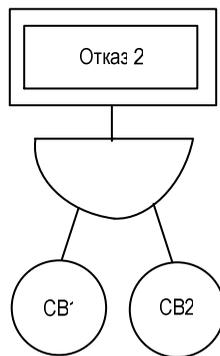


Рис. 4. Дерево отказа 2 для варианта с ГРУ

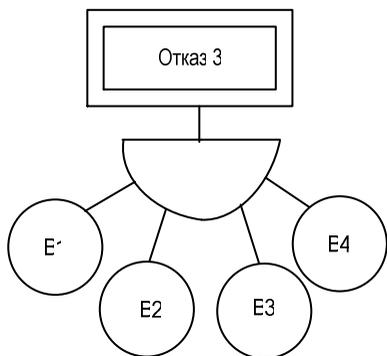


Рис. 5. Дерево отказа 3 для варианта с ГРУ

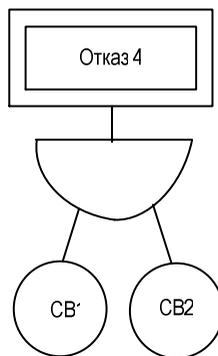


Рис. 6. Дерево отказа 4 для варианта с ГРУ

Вероятность отказа 3 для блочного варианта:

$$P_{3бл} = 1 - ((1 - \omega_{ТСН})(1 - \omega_{Т1})(1 - \omega_{В1})(1 - \omega_{В2})(1 - \omega_{В3})(1 - \omega_{В4})),$$

$$P_{3\text{бл}} = 1 - ((1 - 0,012)(1 - 0,025)(1 - 0,02)(1 - 0,02)(1 - 0,02)(1 - 0,02)) = 0,111,$$

где $\omega_{ГСН1}$, $\omega_{Г1}$, $\omega_{В1}$, $\omega_{В2}$, $\omega_{В3}$, $\omega_{В4}$, – параметры потоков отказа оборудования, [1/год]

Вероятность отказа 3 для варианта с ГРУ:

$$P_{3\text{ГРУ}} = 1 - ((1 - \omega_{В1})(1 - \omega_{В2})(1 - \omega_{В3})(1 - \omega_{В4})),$$

$$P_{3\text{ГРУ}} = 1 - ((1 - 0,02)(1 - 0,02)(1 - 0,02)(1 - 0,02)) = 0,08.$$

Вероятность отказа 2 для варианта с ГРУ:

$$P_{2\text{ГРУ}} = 1 - ((1 - \omega_{СВ1})(1 - \omega_{СВ2})), \quad P_{2\text{ГРУ}} = 1 - ((1 - 0,02)(1 - 0,02)) = 0,04.$$

Вероятность отказа 4 для варианта с ГРУ:

$$P_{4\text{ГРУ}} = 1 - ((1 - \omega_{СВ1})(1 - \omega_{СВ2})), \quad P_{4\text{ГРУ}} = 1 - ((1 - 0,02)(1 - 0,02)) = 0,04.$$

На основе приведенных расчетов можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным вариантом является схема с ГРУ, поскольку вероятность отказа секции ГРУ наименьшая.

Библиографический список

1. **Надежность** и эффективность электроснабжения: учеб. пособие / Б.В. Папков, Д.Ю. Пашали; Уфимс. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2005. – 380 с.

2. **Введение** в теорию надежности энергообъектов: учеб. пособие / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, С.И. Марьянова; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 128 с.

СЕКЦИЯ 19

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Председатель – к.т.н., доцент **Воробьев В.Ф.**
Секретари – к.т.н., доцент **Вихарев А.В.**, маг. **Шадриков Т.Е.**

Е.О. Бородин, маг.; С.А. Константинова, студ.;
рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

СОЗДАНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Основную долю городских электрических сетей составляют кабельные линии электропередачи. Значительная часть кабельных линий имеет бумажно-масляную изоляцию со сроком эксплуатации более 20 лет (до 60 %). В настоящее время интенсивно внедряются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Общая протяженность кабельных линий электропередачи только в Федеральной сетевой компании (ФСК) превышает один миллион километров. Учитывая большую протяженность кабельных линий и, во многих случаях, их длительный срок службы необходимо совершенствовать технологии диагностики изоляции кабелей.

Однако это требует решения дополнительных задач:

1. Изучение электрофизических процессов в изоляции при различных воздействующих напряжениях. Определение факторов, влияющих на эти процессы. Разработка на этой основе методик проведения испытаний.
2. Создание и сертификация новой приборной базы для реализации разработанных методик проведения испытаний.
3. Разработка и утверждение нормативной документации проведения испытаний электроэнергетического оборудования.
4. Подготовка квалифицированных специалистов для электроэнергетики.

Эти задачи могут быть решены в Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ). Университет имеет ряд партнерских соглашений с предприятиями электроэнергетической отрасли. В рамках данных соглашений в ИГЭУ построен новый учебно-лабораторный кор-

пус, где будет установлено новейшее лабораторное оборудование. В состав электроэнергетического факультета входит кафедра «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» (ВЭТФ), сотрудники и преподаватели которой занимаются вопросами диагностики высоковольтной изоляции. При этом кафедра ВЭТФ ведет активную работу по привлечению электроэнергетических предприятий к сотрудничеству в наполнении лабораторий кафедры оборудованием соответствующим реальным требованиям электроэнергетики с перспективой дальнейшего развития этой отрасли.

В настоящее время кафедра ВЭТФ развивает свою научную деятельность по трем направлениям: проектирование и диагностика изоляции, расчет перенапряжений и защита от них, применение высоких напряжений в электротехнологиях. В связи с этим планируется создание ряда уникальных специализированных лабораторий.

При развитии направления по проектированию и диагностике изоляции важной задачей является создание научно-исследовательской электротехнической лаборатории «Полигон для диагностики изоляции высоковольтных силовых кабелей». Создание Полигона позволит решать следующие задачи:

- подготовка и повышение квалификации персонала электроэнергетических предприятий по программам диагностики технического состояния высоковольтных кабелей;
- создание новых лабораторных работ по исследованию электрофизических процессов в кабелях, поиску повреждений в кабельных линиях;
- выполнение научно-исследовательских работ по изучению процессов, происходящих в изоляции кабелей во время испытаний и в режиме нормальной эксплуатации.

При разработке проекта Полигона для диагностики изоляции высоковольтных кабелей необходимо учесть следующие требования:

1) на открытой территории Полигона должны размещаться кабели, заглубленные в грунт. Предполагается разместить 7 – 10 параллельных линий. Максимальная длина линий определяется разрешающей способностью оборудования поиска мест повреждения кабелей волновым методом и составляет 50 – 100 м;

2) полигон должен быть оснащен современным испытательным оборудованием, включающим:

- стандартное оборудование электротехнических испытательных лабораторий;
- оборудование, позволяющее реализовать не стандартные методы испытания высоковольтных кабелей;
- научно-исследовательское оборудование для изучения процессов в кабельной изоляции и создания новых методов испытания кабелей.

3) диагностика изоляции кабелей должна быть максимально приближена к реальным условиям испытаний. Для этого на полигоне предусматривается создание макета распределительного устройства (РУ), аналогичного РУ сетевых предприятий. Компоновка испытательного оборудования должна соответствовать расположению оборудования в передвижных испытательных лабораториях;

4) для проведения научных исследований в высоковольтной кабине Полигона предусматривается испытательное поле для размещения физических моделей участков кабелей.

На кабельной трассе предлагается размещение специально разработанных разрядных ячеек, моделирующих повреждения кабелей. Данные ячейки позволят многократно проводить испытания кабелей, сопровождающиеся пробоем изоляции, что необходимо для организации процесса обучения в данной лаборатории. Также на трассе предлагается создать участки с различными грунтами: песчаный, торфяной, суглинок. Это позволит оценить эффективность использования акустических и индукционных методов поиска повреждений в кабелях при различных грунтах.

Предлагается разместить на трассе кабели с бумажно-масляной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена (рис. 1). При этом по одному кабелю с различной изоляцией должно быть без повреждений и несколько кабелей с различными повреждениями. На кабелях без повреждений будет производиться измерение волновых сопротивлений, коэффициента укорочения линии, других параметров линии.

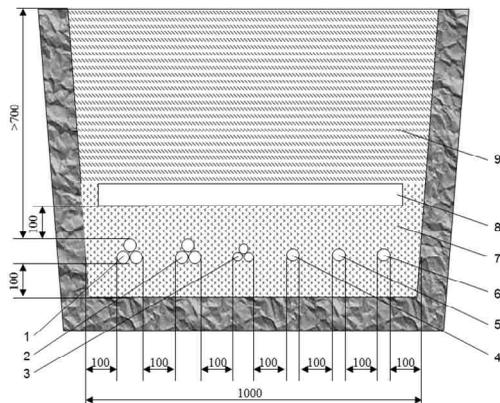


Рис. 1. Прокладка кабеля в траншее: 1 – БМИ кабель на 35 кВ без повреждений; 2 – БМИ кабель на 35 кВ с однофазным КЗ; 3 – БМИ кабель на 10 кВ с междуфазным КЗ; 4 – СПЭ кабель на 35 кВ без повреждений; 5 – СПЭ кабель на 35 кВ с КЗ; 6 – СПЭ кабель на 35 кВ с повреждением защитной оболочки и муфтой (для анализа ЧР); 7 – песчано-гравийная смесь; 8 – железобетонная плита; 9 – засыпной грунт

Кроме того на конце этих линий возможно подключение различных физических моделей (модели оборудования, модели повреждений) для проведения научных исследований. На кабелях с повреждениями планируется воспроизвести основные повреждения в кабельных линиях (однофазные и междуфазные короткие замыкания, повреждение защитной оболочки кабеля). Длина кабельной трассы определяется разрешающей способностью оборудования поиска мест повреждения кабелей волновым методом и должна составлять 50 – 100 м.

Основное назначение научно-исследовательской лаборатории «Полигон для диагностики изоляции высоковольтных силовых кабелей» – изучение современных методов диагностики кабельных линий. Поэтому на Полигоне предполагается установить полномасштабную электротехническую лабораторию по диагностике кабелей в стандартной комплектации передвижной лаборатории (например, лаборатория ЛК 10+, выпускаемая ЗАО «ОбнинскЭнергоТех»). При этом предполагается создание в лаборатории модели кунга автомобиля. Оборудование лаборатории, необходимое для проведения соответствующих методов испытания представлено в табл. 1.

Таблица 1. Оборудование полигона и соответствующие методы испытания

Метод испытания	Оборудование
Повышенной постоянное и переменное напряжение, измерение тока утечки	АИД-60П «Вулкан»
Измерение емкости и угла диэлектрических потерь кабельной изоляции	СА-7100/3
Прожигание поврежденной изоляции	МПУ-3 «Феникс», АИД-60П «Вулкан»
Индукционный метод поиска повреждения	КП-500К, «Трассофон»
Акустический метод поиска повреждения	МПУ-3 «Феникс», АИД-60П «Вулкан», ГВИ-20/1
Поиск мест повреждения без прожига	ГВИ-20/1, «Рейс-305»
Поиск мест повреждения оболочки изоляции	ПКО-5
Измерение уровня ЧР	ИЧР 201, «Рейс-305»

Также на базе Полигона предполагается выполнение научно-исследовательских работ, для которых будет не достаточно оборудования стандартной лаборатории ЛК 10+. Так, например, предполагается изучение частичных разрядов в кабельной изоляции. Поэтому было принято решение о размещении на территории Полигона стенда по изучению частичных разрядов в высоковольтной изоляции.

Таким образом, основные составляющие научно-исследовательской лаборатории «Полигон для диагностики изоляции высоковольтных силовых кабелей»:

1. Два распределительных устройства (РУ) с подключенными высоковольтными кабелями (в начале и конце кабельных линий). Наличие 2 РУ позволит моделировать 2 учебные подстанции, что повысит гибкость выполняемых на Полигоне работ.

2. Полномасштабная электротехническая лаборатория ЛК 10+.

3. Высоковольтный стенд по измерению частичных разрядов в изоляции. Стенд является самостоятельной частью Полигона, но при работе с кабельными линиями возможно объединение с оборудованием ЛК 10+ (например, использование рефлектомера «Рейс-305»).

Создание новой лабораторной базы позволит проводить научные исследования в области кабельной техники по следующим направлениям:

- изучение электрофизических процессов в различных изоляционных материалах (бумажно-масляная и маслобальберная изоляция, сшитый полиэтилен, пластмассы, резина и др.). Это позволит оценить эффективность применения различных изоляционных материалов в кабельной технике, позволит проводить работы по исследованию комбинированной изоляции, а также проводить работы по внедрению в производство кабелей с новыми типами изоляции;

- изучение влияния режимов и условий работы кабелей на распределение тепловых и электрических полей. Анализ этих полей позволит оценить процессы старения кабельной изоляции и разработать рекомендации по повышению надежности электропередач проектировщикам и эксплуатационному персоналу;

- разработка локационных методов детектирования частичных разрядов по длине кабеля. Метод предполагает создание импульсного источника испытательного напряжения с длительностью от нескольких десятков наносекунд. Высоковольтный испытательный импульс, пробегая по всей длине кабеля, инициирует в его изоляции частичные разряды (ЧР). Анализ измеренных ЧР на конце кабеля позволит определить место возникновения ЧР и оценить по параметрам ЧР остаточный ресурс изоляции.

Использование Полигона в учебной деятельности предполагает создание лабораторного комплекса по методам испытаний высоковольтных кабелей. При этом часть лабораторных работ будет включена в общие учебные курсы «Техника высоких напряжений» и «Электротехническое материаловедение» для направления подготовки «Электроэнергетика», а часть лабораторных работ войдет в спецкурсы подготовки по профилю «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника» направления «Электроэнергетика».

Организация на базе Полигона курсов повышения квалификации позволит сотрудникам электроэнергетических предприятий освоить учебные программы, связанные с изучением электрофизических процессов

в изоляции кабелей, методов их диагностики, нормируемых показателей, а также типовых электротехнических лабораторий (подстанционные, кабельные, комбинированные).

*А.А. Иванова, маг.; рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Надежность работы энергосистем в значительной степени определяется техническим состоянием силовых трансформаторов и автотрансформаторов. В настоящее время, порядка 40 % силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, установленных на энергопредприятиях России, находятся в эксплуатации более 25 лет. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 – 500 кВ установленных на тепловых и гидравлических электростанциях, предприятиях электрических сетей показывает, что удельное количество технологических нарушений в их работе составляет порядка 2 % в год, при этом порядка 0,6 % в год составляет удельная повреждаемость силовых трансформаторов, сопровождавшаяся внутренними короткими замыканиями.

Основные причины тяжелых повреждений силовых трансформаторов в эксплуатации связаны в первую очередь с повреждениями обмоток, высоковольтных вводов, устройств РПН как из-за развития дефектов под влиянием эксплуатационных факторов, так и из-за ошибочных или недостаточных действий при монтаже, ремонте и эксплуатации. Следует также отметить проблему старения изоляции обмоток, связанную с общей проблемой старения парка силовых трансформаторов.

Благодаря достаточно высокой эффективности системы диагностического и ремонтного обслуживания в 90-х годах прошлого столетия в отношении силовых трансформаторов раньше, чем по другим видам энергетического оборудования, начала реализовываться концепция перехода от нормативно-календарного планирования ремонтов к их проведению «по состоянию», то есть в зависимости от фактического технического состояния. Оценка технического состояния силовых трансформаторов в эксплуатации ведется по комплексу контролируемых показателей и их нормативам.

Анализ применения действующих нормативно-технических документов, рекомендаций СИГРЭ и МЭК выявили необходимость проведения значительного комплекса исследований и разработок новых методов и критериев и совершенствование существующих для оценки технического состояния силовых трансформаторов, причем в первую очередь, с длительными сроками эксплуатации, в том числе, для обеспечения оценки их предельного состояния, обоснования продления их срока эксплуатации и обеспечения надежности работы.

В связи с этим, важно провести анализ имеющихся традиционных и новых методов испытаний изоляции и на этой основе произвести выбор рациональной системы контроля технического состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов, позволяющей повысить эффективность оценки технического состояния трансформаторов и автотрансформаторов.

С учетом этого составлена классификация внутренней изоляции силовых трансформаторов (рис. 1). Отмечается, что техническое состояние изоляции определяется электрической прочностью жидкой и твердой изоляцией, а механическая прочность – твердой изоляцией.

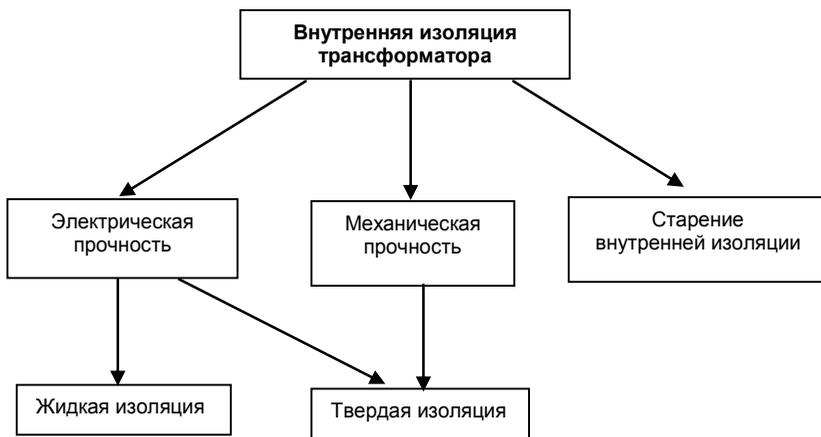


Рис. 1. Классификация внутренней изоляции трансформатора

Разработана также классификация испытаний внутренней изоляции силового трансформатора при различных режимах работы (рис. 2). Для выбора рациональной системы испытаний изоляции важно выявить эффективные методы контроля, применительно к каждому из режимов эксплуатации силового трансформатора.



Рис. 2. Классификация испытаний внутренней изоляции трансформатора при различных режимах его работы

Представленная классификация имеющихся видов испытаний дополнена техническим мероприятием в виде внешнего осмотра всех уплотнений силовых трансформаторов. С учетом важности этого мероприятия необходимо в дальнейшем разработать регламент и протокол по проведению внешнего осмотра и выработки критериев оценки технического состояния уплотнений.

Составлен перечень испытаний и измерений, проводимых при разных режимах (состояниях) трансформатора.

Трансформатор отключен и расшинован:

- отбор проб масла из бака трансформатора, бака контактора РПН и вводов для физико-химических и хроматографических анализов (допускается выполнение и при других режимах трансформатора при наличии технических возможностей);

- измерение тока и потерь холостого хода при пониженном напряжении;
- измерение $\text{tg}\delta$, R и C изоляции обмоток;
- измерение сопротивления короткого замыкания (Z_K);
- измерение сопротивления обмоток постоянному току;

- расчетная оценка влагосодержания и остаточного ресурса твердой изоляции;
- измерение коэффициента трансформации (при необходимости, например, после проведения ремонтных работ);
- контроль РПН (ПВБ) в соответствии с инструкциями завода-изготовителя.

Трансформатор под рабочим напряжением, холостой ход:

- тепловизионное обследование бака и других узлов трансформатора;
- вибрационное обследование бака трансформатора;
- измерение параметров ЧР и других разрядов электрическим методом;
- акустическое обследование и локация электрических разрядов акустическим методом;
- измерение tgδ и С изоляции вводов (при наличии возможности).

Трансформатор под рабочим напряжением, нагрузка:

- тепловизионное обследование бака и других узлов трансформатора;
- вибрационное обследование бака трансформатора;
- измерение параметров ЧР и других разрядов электрическим методом;
- акустическое обследование и локация электрических разрядов акустическим методом.

При дальнейшем развитии данной работы планируется проанализировать методы испытаний изоляции трансформаторов при различных режимах его работы, выявить наиболее информативные методы с учетом новых разработок в этой области.

Библиографический список

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М.: ЭНАС, 1998.
2. **Общий** подход к эксплуатации длительно работающих крупных трансформаторов / Ю.Н. Львов, Н.Н. Хубларов // Вестник ВНИИЭ-97. – 1997.
3. **О повреждениях** силовых трансформаторов напряжением 110 – 500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин [и др.] // Электрические станции. – 2001. – № 9.

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

УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ

Проблема аварийности высоковольтного оборудования и экономическая потребность в фактическом продлении его срока службы приводят

к необходимости внедрения эффективных методов диагностики оборудования и силовых кабельных линий. Их создание и внедрение может не только повысить эксплуатационную надежность, но и уменьшить материальные затраты на обслуживание и испытания.

За последние 20 лет происходило постепенное изменение стратегии диагностирования оборудования: обоснование неэффективности регламентных испытаний и переход от них к испытаниям оборудования по его техническому состоянию. Одновременно решалась задача создания системы диагностирования в режиме автоматизированного мониторинга параметров оборудования под рабочим напряжением. Для обеспечения диагностики оборудования и силовых кабельных линий под рабочим напряжением разрабатывались соответствующие методы и реализующие их технические средства. К таким методам, прежде всего, следует отнести методы регистрации частичных разрядов (ЧР), позволяющие обнаруживать локальные дефекты.

ЧР представляет собой искровой разряд малой мощности, возникающий внутри изоляции или на ее поверхности в оборудовании среднего и высокого классов напряжения. Появление ЧР сопровождается следующими физическими явлениями: протеканием импульсного тока в цепях источника высокого напряжения; электромагнитным и световым излучениями в окружающее пространство; ударной волной; разложением диэлектрика на молекулярные группы в зоне действия ЧР; нагревом локальных объемов изоляции с ЧР.

В результате ЧР изоляция разрушается, характеристики ЧР при этом изменяются и это изменение характеристик можно использовать для диагностики изоляции и оценки ее состояния. Физические процессы и явления, сопровождающие ЧР в изоляции, могут быть зарегистрированы и измерены соответствующими техническими средствами. Эта возможность в настоящее время реализована в применяющихся способах контроля ЧР. Наиболее распространенными из них являются электрический, электромагнитный и акустический.

Акустический метод регистрации ЧР разрабатывался с целью обнаружения источника ЧР в оборудовании, например, в силовых и измерительных трансформаторах, элегазовом оборудовании. В них помещаются сверхчувствительные микрофоны, которые улавливают звуковые волны, расположенные в диапазоне частот выше порога слышимости. Данный метод является дистанционным и позволяет располагать датчики и сенсоры в устройствах открытой конструкции, например ячейках КРУ и шинопроводах. Недостатком метода является малая чувствительность при регистрации ЧР малой интенсивности.

Электромагнитный, или дистанционный, СВЧ-метод позволяет обнаружить ЧР с помощью направленного приемного СВЧ антенного устройства. Этот метод не требует контакта с объектом измерения. Недостатками является невозможность количественной оценки наиболее значимых характеристик ЧР, а также влияние на результаты контроля ЧР электромагнитных возмущений, создаваемых другими техническими средствами.

Электрический метод требует контакта измерительных приборов с объектом измерения. При этом регистрируется наибольшее количество характеристик ЧР, позволяющих всесторонне изучить ЧР, в связи с чем данный метод наиболее перспективен в плане практической реализации.

Наибольшие трудности при измерении электрических сигналов ЧР в условиях эксплуатации вызывает выделение сигналов ЧР, возникающих в высоковольтной изоляции контролируемого оборудования из полного спектра электромагнитных колебаний, включающего в себя электромагнитные внутренние и внешние помехи. Токи помех и токи ЧР создают одинаковые по фазе импульсы напряжений на измерительном элементе (см. рис. 1). Так как временные характеристики импульсов токов ЧР лишь незначительно отличаются от импульсов токов, вызываемых помехами, большинство предлагаемых методов идентификации импульсных токов ЧР оказываются не достаточно эффективными.

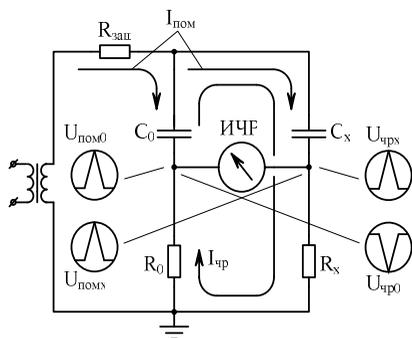


Рис. 1.

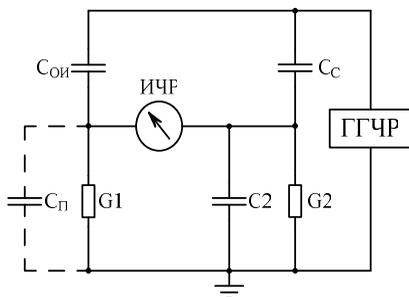


Рис. 2.

Наиболее перспективным в плане устранения помех является использование и дальнейшее совершенствование мостовой схемы. Принцип отделения полезного сигнала от внешних шумов и помех состоит в следующем: токи помех, проходя на землю через объект и соединительный

конденсатор, представленные емкостями, создают синфазные падения напряжения на измерительных элементах (R_0 , R_x). В то же время ток частичных разрядов вызывает противофазное падение напряжения на измерительных элементах в цепи исследуемого объекта и соединительного конденсатора, которое регистрируется измерительным устройством (см. рис. 1).

Модификацией рассмотренного способа является способ, реализованный в измерителе характеристик ЧР ИЧР-201. В комплект прибора входят: прибор-измеритель частичных разрядов (ИЧР-201), измерительный элемент (ИЭ) с разделительным трансформатором, два фильтра высоких частот (ФВЧ), градуировочный генератор (калибратор) частичных разрядов (ГТЧР), соединительные кабели и мобильный персональный компьютер (ноутбук).

Прибор позволяет измерять мгновенные значения испытательного напряжения и соответствующие им значения характеристик ЧР: кажущийся заряд импульсов ЧР (q); их полярность и фазу; частоту следования (n), средний ток (I), энергию (P) и среднеквадратичный параметр (D) импульсов ЧР.

Перед проведением измерений ЧР необходимо отградуировать установку и сбалансировать измерительный мост. Целью проведения градуировки является определение коэффициентов пропорциональности между показаниями измерительного устройства и соответствующими характеристиками ЧР. Градуировка прибора в измерительной схеме должна проводиться с полностью собранной испытательной установкой при присоединенном объекте испытаний. Для пояснения процесса балансировки на рис. 2 дана принципиальная схема настройки моста при измерении характеристик ЧР по мостовой схеме. Условием достижения баланса моста является выполнение равенств:

$$\frac{C_c}{G_2} = \frac{C_{ои}}{G_1}; \quad \frac{C_{п}}{G_1} = \frac{C_2}{G_2}.$$

Прибор обеспечивает визуальное отображение в реальном масштабе времени различных (по выбору оператора) видов осциллограмм измерений, включая трехмерные, а также графики хода испытаний с измерением характеристик ЧР. Осуществляемая прибором шумовая, пороговая и позиционная фильтрации измерительного сигнала обеспечивают высокую помехозащищенность измерений и прибор не требует, как правило, специальных, тщательно экранированных помещений.

Е.А. Любимов, студ.; рук. С.А. Словесный, к.т.н., доцент

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

На сегодняшний день в электроэнергетике все более актуальной становится проблема электромагнитной совместимости (ЭМС). Это обусловлено целым рядом причин, в том числе и постоянно расширяющимися масштабами применения новейших измерительных средств, основной задачей которых является обмен информацией.

Современные информационно-измерительные средства выполняются на микроэлементной и микропроцессорной базах, что делает их более чувствительными к внешним и внутренним электромагнитным помехам. Данные измерительные средства должны быть защищены от внешних электромагнитных помех (ЭМП).

Электромагнитная помеха – это любое электромагнитное явление естественного или искусственного происхождения, которое может ухудшить качество функционирования технического средства.

Для защиты от ЭМП необходимо понимание механизмов влияния электромагнитного возмущения на объекты энергетики.

Существуют три основных канала передачи ЭМП: гальваническая связь, емкостная связь и индуктивная связь.

Гальваническое влияние осуществляется через общее полное сопротивление участка между источником помех и защищаемым техническим средством. Как правило, это сопротивление систем защитных и заземляющих проводов.

Уменьшение влияния ЭМП через гальванические связи обеспечивается выбором оптимальной схемы заземления оборудования или гальваническим разделением контуров.

Внешнее электрическое поле воздействует на объекты электроэнергетики через емкостную связь между источником помех и рецептором. Для уменьшения емкостной связи осуществляется экранирование (рис. 1).

Негативное воздействие электрических полей на объекты электроэнергетики обусловлено воздействием емкостных токов в промежутке между источником поля – 1 и объектом – 2. Помещение защищаемой линии – 2 в экран – 3 сопровождается существенным уменьшением геометрической емкости C_{12} и, следовательно, емкостного тока, проходящего через нагрузку информационной линии.

Индуктивная составляющая ЭМП обусловлена паразитными потосцеплениями между контурами. Для уменьшения негативного влияния

внешних магнитных полей на работу информационных линий применяют перекручивание проводов (витая пара) и экранирование. При этом, во-первых, уменьшается площадь контура взаимодействующего с внешним магнитным полем, по которой проходит ток нагрузки, во-вторых, индуцируемый внешним магнитным полем ток шумов, проходя по экрану или второму проводнику, создает магнитное поле, направленное встречно внешнему, результирующее поле уменьшается, а значит, уменьшается и уровень помех, наводимых в информационной линии.

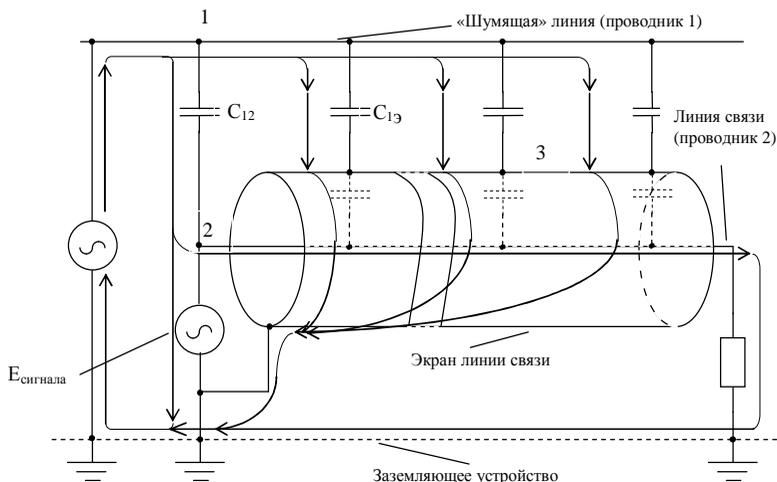


Рис. 1. Снижение помех путем экранирования

Эффективность экранирования внешних магнитных полей зависит от множества факторов (параметры линий связи, неравномерность распределения помехонесущего поля, наличие сторонних проводящих элементов и т.п.), которые достаточно сложно учесть при создании расчетной модели, поэтому при анализе эффективности экранирования информационных линий часто применяют экспериментальные способы. При экспериментальной оценке эффективности экранирования информационных линий внешнее помехонесущее поле моделируется путем подключения генератора испытательных сигналов к шумящей линии, расположенной параллельно исследуемым защищаемым линиям связи. В качестве исследуемых линий выбраны витая пара с экраном и без экрана и коаксиальный кабель.

Схема-а имеет большую петлю, образованную «прямым» проводом и «землей». Эта цепь подвержена прежде всего влиянию магнитной со-

ставляющей. Экран заземлен в одной точке и не защищает от магнитного влияния. Затухание для этой цепи принимается равным 0 дБ.

В схеме-б под действием внешнего поля формируется ЭДС взаимной индукции в экране и проводнике, и вызываемый этой ЭДС ток шумов. Магнитное поле, создаваемое током шумов экрана, направлено встречно внешнему полю. В результате взаимной компенсации полей индукция результирующего магнитного поля уменьшается, а, следовательно, снижается напряжение шумов на нагрузке.

В схеме-в использование витой пары по эффективности экранирования приближается к схеме-б. Сопротивление второго сигнального проводника витой пары больше, чем сопротивление экрана, поэтому и ток шумов в нем меньше чем в экране, и экранирующий эффект меньше чем для коаксиальной линии.

Наибольшей эффективностью экранирования обладает линия, изображенная на схеме-г. Витая пара защищает линию от внешнего магнитного, а заземленный экран – от внешнего электрического поля.

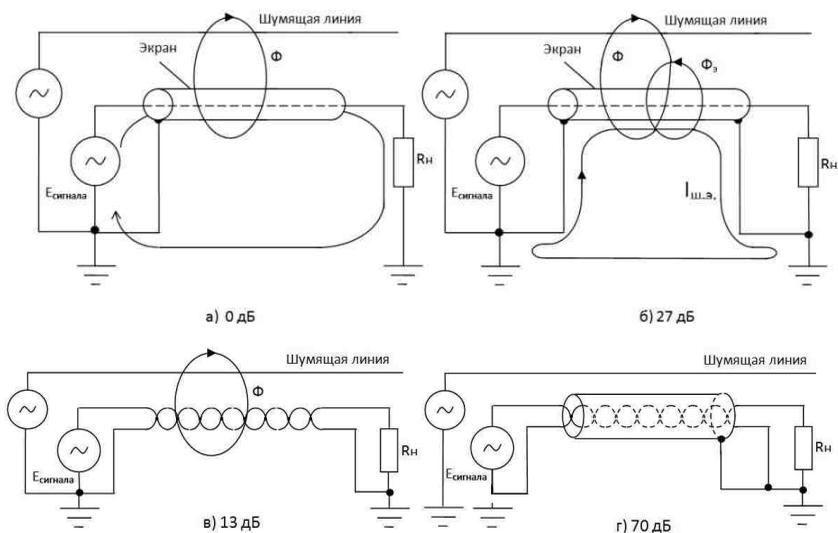


Рис. 2. Схемы защиты информационных линий от ЭМП

Разработанный лабораторный стенд позволяет моделировать воздействия широкого спектра электромагнитных возмущений на разные типы линий при разных вариантах соединения экранов с элементами информационных линий.

*Е.А. Марюшко, маг.; рук. С.С. Шевченко, ассистент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

РАЗРАБОТКА АНАЛОГОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В настоящее время при проведении измерений на объектах электроэнергетики существует целый ряд проблем препятствующих получению достоверных данных с измерительных приборов. К ним можно отнести: сложную электромагнитную обстановку, обусловленную наложением различных электромагнитных полей, источниками которых в основном являются силовые трансформаторы, электростатические поля от ошинок подстанций, и другого высоковольтного электрооборудования, воздействующие на измерительные приборы и цепи. Такого рода проблемы могут привести к выходу из строя измерительной техники, искажению результатов измерений, что в дальнейшем может повлечь к значительным финансовым потерям.

Особенно остро проблема электромагнитной совместимости высокочувствительных измерительных приборов проявила себя при проведении контрольных диагностических измерений на ОРУ, действующих объектов электроэнергетики. Это связано с тем, что персонал сторонних компаний производящих измерения не обладает полной картиной электромагнитной обстановки на объекте, данный факт не позволяет полностью отстроиться от наведенных помех и может, приводит к значительным методическим погрешностям [1 – 2].

На текущий момент существуют различные способы защиты измерительных цепей и снижения уровня наведённых помех, например экранирование, гальваническая развязка, установка пассивных и активных фильтров. Традиционно используемые способы позволяют довольно эффективно бороться с указанными проблемами, однако они не являются совершенными, поэтому необходимо искать новые решения позволяющие с меньшими затратами и более эффективно проводить измерения в высоковольтной электроэнергетике.

Одним из возможных решений данной задачи может являться использование аналогового волоконно-оптического измерительного тракта.

Использование оптоволокна в качестве канала передачи сигнала имеет следующие преимущества [3]:

- широкая полоса пропускания сигнала от 0 до 200 МГц, что позволяет передать сигнал как стандартной частоты 50 Гц, так и высокочастотный;

- минимальное воздействие электромагнитного и электростатического поля на оптоволокно, что обеспечивает защиту передаваемого сигнала от наведённых помех;

- оптоволокно производится из диэлектрических материалов, что позволяет без дополнительных средств реализовать гальваническую развязку и защитить с её помощью, регистрирующую аппаратуру от перенапряжений, а персонал от поражения электрическим током.

Разрабатываемый волоконно-оптический измерительный тракт включает в себя следующие элементы:

- передатчик – прибор, преобразующий электрический сигнал, поступающий от первичного датчика, в оптический сигнал;

- канал передачи сигнала, волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС);

- приёмник - устройство, преобразующее оптический сигнал в электрический и передающее его на регистрирующую аппаратуру;

На рис. 1 представлена схема применения волоконно-оптического измерительного тракта.

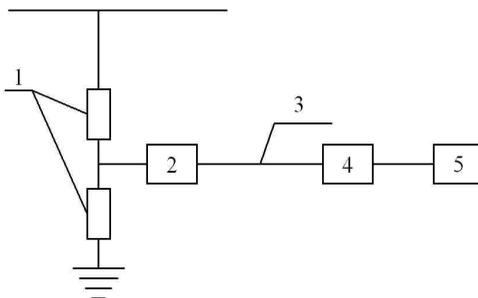


Рис. 1. Схема применения волоконно-оптического измерительного тракта: 1 – первичный датчик, 2 – передатчик, 3 – ВОЛС, 4 – приёмник, 5 – регистрирующий прибор

Прототипом для разрабатываемого волоконно-оптического измерительного тракта стала система, приведенная в журнале *Electric Power Systems Research* [4]. Представленный в статье передатчик обладает следующими недостатками:

- нижняя граница полосы пропускания 100 кГц, что не позволяет использовать данный передатчик для работы на промышленной частоте;

- выходной ток несколько изменяется при изменении выходного напряжения, т.е. выходное сопротивление схемы не бесконечно, что приводит к искажению передаваемого сигнала.

В процессе модернизации прототипа было увеличено его входное сопротивление и стабилизированы выходные параметры.

На следующем этапе работы был собран физический макет системы и проведено исследование его амплитудно-частотных характеристик.

Исследование проводилось следующим образом: с генератора на вход передатчика был подан сигнал заданной формы, частоты и амплитуды, к входу передатчика и выходу приемника был подключен осциллограф. Таким образом, при подаче сигнала, осциллографом были записаны две синхронизированных кривых исходного и принятого сигнала, аналогичная операция была проведена для всего спектра частот. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

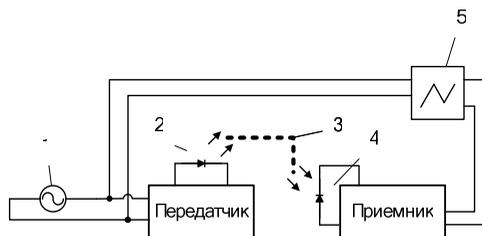


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – генератор, 2 – лазерный диод, 3 – оптоволоконный кабель, 4 – фотодиод, 5 – осциллограф

По полученным в результате эксперимента данным были рассчитаны сдвиг фазы, изменение амплитуды сигнала и построена кривая относительного отклонения амплитуды сигнала от частоты, представленные на рис. 3. Из неё следует, что система имеет высокую степень линейности полосы пропускания в диапазоне от 0 до 1 МГц, что позволяет использовать его для передачи сигнала стандартной частоты 50 Гц и высокочастотных сигналов.

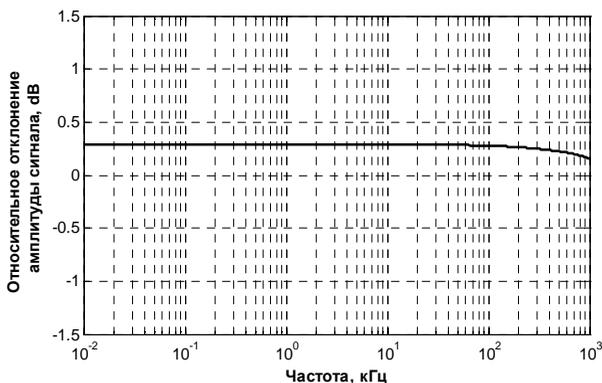


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптического измерительного тракта

Современные цифровые измерительные системы работают с различными протоколами передачи данных, это приводит к сложностям при стыковке оборудования различных производителей, а зачастую к полной непригодности совместного использования некоторых устройств.

В представленном волоконно-оптическом измерительном тракте передача сигнала осуществляется в аналоговом виде. Таким образом, представленное выше устройство без дополнительных затрат может быть внедрено, как во вновь проектируемые комплексы мониторинга и диагностики так и в уже существующие системы.

На сегодняшний день данный проект размещен в студенческом бизнес инкубаторе НГТУ, где ведётся активная работа по созданию опытного образца системы. На внутреннем конкурсе инновационных проектов НГТУ получен грант на дальнейшие исследования, а также подана заявка на получение патента на полезную модель по данному устройству.

Библиографический список

1. **Дьяков, А.Ф.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 761 с.
2. **Матвеев, М.В.** Электромагнитная обстановка на объектах определяет ЭМС цифровой аппаратуры / М.В. Матвеев // Новости электротехники. – 2002. – № 1(13), 2(14).
3. **Гуртов, В.А.** Г957 Оптоэлектроника и волоконная оптика / В.А. Гуртов; ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд во ПетрГУ, 2005. – 100 с.
4. **A high-voltage low-cost wide-band fiber optic transmission system with improved linearity** / I.S. Halkiadis, N.G. Theofanous, D.A. Greaves // Electric Power Systems Research . – 1997. – 37. – Pp. 121 – 128.

*А.А. Уваров, А.В. Наумов, Н.А. Матвеев, студенты;
рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДЫ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ ПО ЗАВИСИМОСТИ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В современных условиях России в электроэнергетике производится непрерывный контроль состояния изоляции электрооборудования. Находящееся в эксплуатации оборудование в большинстве своем выработало свой ресурс, что приводит к перебоям в электроснабжении, во многом связанным с потерей изоляцией своих электроизоляционных свойств

вследствие химико-физического старения, накопления твердых примесей, влаги и образования различных газовых включений.

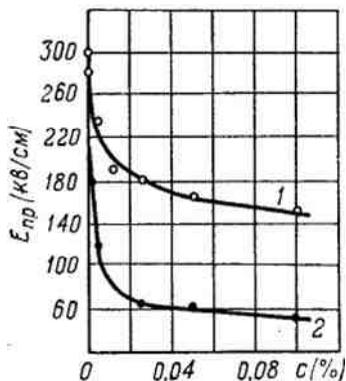


Рис. 1. 1, 2 – соответственно 65 и 25 °С

в масло и другие. Но они сложны и требуют уникального оборудования и высокой квалификации персонала, что сложно обеспечить в отдалённых и труднодоступных районах страны. В этих условиях возникает необходимость в разработке упрощенных способов оценки содержания влаги в масле на основе экспериментальных данных.

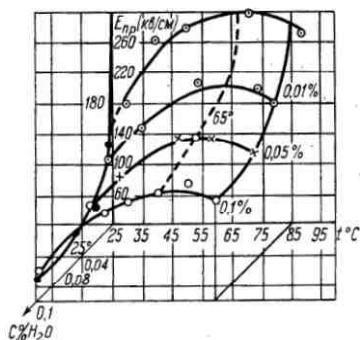


Рис. 2.

пробивной напряженности от температуры и влагосодержания (рис. 3) можно отметить, что зависимость пробивной напряженности от температуры изменяется с разной крутизной, в зависимости от концентрации влаги. На графиках видны две характерные критические точки, соответственно при 60 и 25 °С.

Одним из важных параметров состояния изоляции является содержание влаги, которая оказывает ощутимое влияние на электрическую прочность жидких диэлектриков (рис. 1). На вид этих зависимостей оказывает большое влияние температура трансформаторного масла.

В связи с этим контролю содержания влаги в изоляции уделяется особое внимание. Существует несколько методов оценки увлажнения изоляции: хроматографический анализ, оценка степени увлажнения по температурной миграции влаги

Анализ имеющихся экспериментальных результатов [1] показал, что зависимость электрической прочности трансформаторного масла имеет сложный вид при различных температурах и содержании влаги (рис. 2). Здесь эта зависимость представлена с помощью поверхности второго порядка. Однако, такое представление экспериментальных результатов затрудняет восприятие информации и оценку степени увлажнения трансформаторного масла.

Проанализировав зависимость,

С уменьшением содержания концентрации влаги в масле наблюдается уменьшение крутизны возрастания его электрической прочности. С учетом этого можно предложить способ контроля влагосодержания масла по степени возрастания пробивной напряжённости масла при различных значениях его влагосодержания.

С этой целью предлагается ввести некоторый безразмерный коэффициент влажности $K_B = \frac{E_{ПР.60^\circ}}{E_{ПР.25^\circ}}$,

где $E_{ПР.60^\circ}$ и $E_{ПР.25^\circ}$ – пробивные напряженности масла при температурах 60 и 25 °С соответственно. Используя зависимости $E_{ПР} = f(T, C_{ВЛ})$, можно проследить за изменением коэффициента влажности от влагосодержания. В соответствии с предложенным методом, по экспериментальным данным (рис. 3) определены значения коэффициента влажности. Результаты расчёта представлены на рис. 4, где приведены экспериментальные значения коэффициента влажности и аппроксимирующая зависимость коэффициента влажности от влагосодержания.

Отмечается, что с уменьшением влагосодержания, коэффициент влажности уменьшается и стремится к единице при нулевом влагосодержании.

Для удобства практического применения, исследуемая зависимость представлена в увеличенном масштабе в диапазоне практически встречающихся влагосодержаний (рис. 4.б).

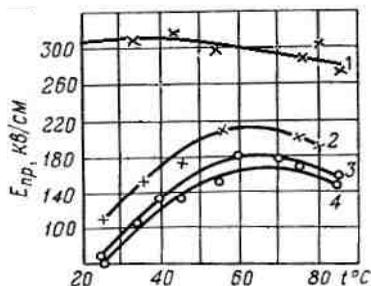
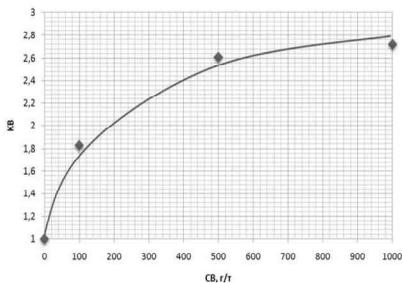
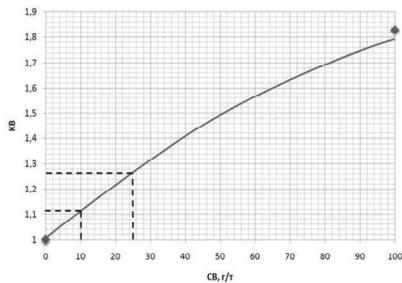


Рис. 3. 1, 2, 3, 4 – влагосодержание масла, соответственно при 0, 100, 500, 1000 г/т



а)



б)

Рис. 4.

На этом же рисунке отмечены нормируемые уровни содержания влаги маслом, подготовленным к заливке в электрооборудование (содержание влаги 10 г/т), а так же для эксплуатационного масла (содержание влаги 25 г/т), в соответствии с [2]. Отмечается, что соответствующее значения коэффициента влажности находятся в пределах от 1.11 до 1.26. Это свидетельствует о том, что полученные данные являются значимыми и различимыми.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности оценки концентрации воды в трансформаторном масле по зависимости его электрической прочности от температуры, в соответствии с приведенным методом.

Библиографический список

1. **Сканави, Г.И.** Физика диэлектриков. Область сильных полей / Г.И. Сканави. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958.
2. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытания электрооборудования. – М., 1998. – 154 с.

*О.С. Мельникова, асп.; рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В МАСЛОПРОВОЙНИКЕ

Существует несколько методик, относящихся к определению пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике. В частности были рассмотрены методики различных стран : ГОСТ 6581-75 (Россия), ASTM D1816-67 (1971) (США), VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12 (Германия), IEC 60156 1995 (Международная электротехническая комиссия (МЭК)).

В табл. 1 представлены методики испытаний трансформаторного масла в маслопробойнике по ГОСТ 6581-75, ASTM D1816-67 (1971), VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12, IEC 60156 (1995).

Стандарты России и Германии в своих регламентах имеют ссылки на методику стандарта международной электротехнической комиссии МЭК.

Рассмотренные методики испытания масла на электрическую прочность предусматривают общий порядок проведения испытания: подго-

товку установки, включающей повышающий трансформатор, защитное оборудование, источник питания, регулирование напряжения, вольтметр. Также установка содержит сосуд – измерительную ячейку с электродами. В измерительную ячейку помещается проба трансформаторного масла. Также регламенты испытаний включают подготовку и проведение испытаний, отбор и подготовку пробы масла, обработку результатов и оценку достоверности испытаний. Испытание пробы служит основанием для проверки отсутствия вредных примесей в масле.

Приведенные методики определения пробивного напряжения имеют существенные различия. Принципиальные различия заключается в конструкции испытательной ячейки. В Стандарте США указывается объемом испытательной ячейки 0,95 л, также указывается, что были проведены испытания ячейки вместимостью около 0,4 л с расстоянием между электродами 1,02 мм. Остальные методики имеют меньшее значение объема испытательной ячейки и, соответственно, объема масла в ней. Испытательная ячейка по стандарту США должна быть снабжена пропеллерной мешалкой с приводом от электродвигателя, также ячейка должна быть снабжена крышкой или экраном во избежание попадания воздуха в процессе перемешивания жидкости.

Таблица 1. Традиционные методики определения пробивного напряжения в маслопробойнике

Контролируемые параметры	Страна			IEC 60156 1995 (МЭК)
	Россия ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81)	США ASTM D1816-67 (1971)	Германия VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12	
Частота, Гц	50	60	50	48 – 62
Вязкость, м ² /с	< 5·10 ⁻³	–	–	< 0,35 10 ⁻³ при 40 °С
Повышающий трансформатор	+	+	+	+
Среднее пробивное напряжение жидкого материала от номинального напряжения трансформатора	15 %	–	15 %	15 %
Выключающее (защитное оборудование)	+	+	+	+
Регулирование напряжения	+	+	+	+
Вольтметр	+	+	+	+
Источник питания	+	+	+	+
Электроды	сферической формы диаметром 25 мм	VDE-электроды	сферической формы диаметром 25 мм	сферической формы диаметром 12,5 – 13 мм

Контролируемые параметры	Страна			IEC 60156 1995 (МЭК)
	Россия ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81)	США ASTM D1816-67 (1971)	Германия VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12	
Подготовка электродов	+	+	+	+
Расстояние между электродами, мм	2,5 ± 0,05	2,04	2,5 ± 0,05	2,5 ± 0,05
Объем, требуемый для одного определения (порция)	не менее 300 мл	0,95 л	400 ± 100 см ³	350 – 600 мл
Температура при определении пробивного напряжения, °С	15 – 35	–	–	–
Выдержка пробы масла в помещении перед испытанием, мин	не менее 30	–	–	–
Скорость подъема напряжения	2 кВ/с ± 20 %	0,5 кВ/с ± 20 %	2 кВ/с	2 кВ/с ± 2 кВ
Сосуд для испытания жидкости	+	+	+	+
Устройство для перемешивания масла	–	+	+	+
Подготовка ячейки перед испытанием	+	+	+	+
Подготовка образца для испытания	+	+	+	+
Перемешивание масла перед испытанием	+	+	+	+
Температура пробы жидкости при испытании	15 – 35 °С	не ниже 20 °С	комнатная температура	20 ± 5 °С
Время выдержки перед началом испытания в сосуде, мин	10	3	10	5
Интервал времени между пробоями, мин	5	1	2	2
Число последовательных пробоев при испытаниях	6	6	6	6
Перемешивание масла при подъеме напряжения	–	+	+	+
Критерий статистического постоянства	$\sigma < 20 \%$	$3(U_{пр,max} - U_{пр,min}) < U_{пр,min}$	–	–
Протокол испытания	+	+	+	+

Стандарт Германии и МЭК также предусматривают применение мешалки. Российский ГОСТ предусматривает использование палочки для перемешивания жидкости.

При испытаниях в данных методиках производятся 6 последовательных пробоев без замены масла, после каждого пробоя предусматривается перемешивание масла в ячейке, но имеются отличия в значениях времён выдержки до начала испытания, после пробоев и длительности перемешивания масла.

Различия заключаются и в определении оценки достоверности результатов испытаний. Стандарт США предусматривает определения значения разности между максимальным и минимальным пробивным напряжением, умноженным на три. Полученное значение должно быть меньше минимального значения пробивного напряжения.

Российский стандарт предусматривает определения коэффициента вариации. Если значение коэффициента вариации превышает 20 %, то в этом случае дополнительно производят еще шесть определений пробивного напряжения.

Приведенный анализ выявил сходства и различия существующих методик по определению пробивного напряжения трансформаторного масла и показал необходимость дальнейшего уточнения значений различных контролируемых параметров и разработки рационального регламента испытаний масла.

*С.О. Мухин, маг.; рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Возможность энергетики народного хозяйства упорно возрастает. Она возникает вследствие концентрации мощностей в линиях электропередачи и на электростанциях, централизации электроснабжения, экономному и комплексному применению энергетических ресурсов, использованию, а также разработке новейших источников энергии.

Вопреки опережающему развитию энергетики формируется неплохое основание в прогрессе во всех сферах промышленности, транспорта, строительства, сельского хозяйства, и конечно же в области роста культурного уровня и достатка людей. Однако, растущая потребность в разных видах энергии призывает к реализации немалых мероприятий по увеличению эффективности работы энергетических установок и предприятий, а также поиску путей применения и образования новых источ-

ников энергии. Но оборудование, которое устанавливается на станции и линии, должно проходить испытания на прочность различными видами перенапряжений. В процессе эксплуатации все оборудование в энергосистеме должно поддерживаться в рабочем состоянии и своевременное выявление дефектов и нарушений одна из главных задач.

Всю испытательную технику можно разделить на группы:

- установки переменного напряжения;
- установки постоянного напряжения;
- установки импульсного напряжения;
 - атмосферные перенапряжения;
 - коммутационные перенапряжения.

Измерительную технику также можно разделить на группы:

- шаровые разрядники;
- стрелочные приборы с добавочными резисторами;
- измерение с использованием прибора и измерительного конденсатора;
- амплитудные вольтметры;
- делители напряжения.

В настоящее время быстро растет спрос на электроэнергию, что приводит к увеличению и усложнению энергетических систем. Вследствие этого не всегда возможно провести испытания оборудования в лаборатории. Для таких ситуаций существуют передвижные лаборатории. Примером могут служить лаборатории Лаборатория высоковольтных испытаний серии ЛВИ НVT-3G и лаборатория для испытания трансформаторов TransLAB-2 производства холдинговой компании «ЭМЗ».

ЛВИ НVT-3G предназначена для проведения следующих работ:

- испытаний оборудования подстанций и распределительных устройств с рабочим напряжением до 35 кВ;
- испытаний силовых кабельных линий с рабочим напряжением до 10 кВ;
- определения мест повреждения в силовых кабелях с рабочим напряжением до 10 кВ с использованием оборудования и приборов предварительной и точной локализации.

Преимуществом данной лаборатории в том, что в качестве базового автомобиля применен автомобиль КАМАЗ обеспечивающий возможность работы лаборатории не только в городских условиях, но и при работе на пересеченной местности за счет высокой проходимости автомобиля.

TransLAB-2 предназначена для проведения следующих работ:

1. измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции по «прямой» и «перевернутой» схемам;
2. низковольтных измерений параметров силовых и измерительных трансформаторов;

3. измерений активного сопротивления обмоток одно- и трёхфазных трансформаторов, двигателей и другого оборудования.

Функции TransLAB-2:

4. измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции по «прямой» и «перевернутой» схемам;

5. низковольтные измерения параметров одно- и трёхфазных силовых и измерительных трансформаторов.

Данная лаборатория построена на базе Форда транзит. Преимуществами фургона Форд Транзит являются его хорошая аэродинамическая форма и большая вместимость кузова, где удобно можно расположить оборудование и создать благоприятные условия для операторов.

Вынесенная вперед кабина комфортна для троих, оборудована кондиционированием, системой автоматического регулирования скорости, электрическими стеклоподъемниками, центральным замком с дистанционным управлением и с противоугонным устройством как стандарт.

Но есть определенные проблемы, это возможность не всегда найти источник питания для лаборатории. Для решения этой проблемы существуют передвижные электростанции. Примером можно привести дизельную электростанцию 1300 кВт с двигателем Deutz модель АД 1300-T400 производства «Группы Компании Азимут».

Существуют различные системы мониторинга высоковольтного оборудования. Выделим три из них:

- диагностика и мониторинг кабельных и воздушных линий;
- комплексные системы мониторинга и диагностики;
- мониторинг и диагностика силовых трансформаторов.

Приведем примеры на оборудовании компании «DIMRUS» для каждой системы.

Диагностика и мониторинг кабельных и воздушных линий:

CPDA – система контроля изоляции кабельных линий по частичным разрядам, метод «OWTS». Переносная система марки «CPDA» («Cable Partial Discharge Analyzer») предназначена для диагностики состояния изоляции кабельных линий с использованием одного из современных методов, называемого в литературе OWTS (Oscillating Wave Test System).

Комплексные системы мониторинга и диагностики:

OVM-3 – система мониторинга состояния изоляции кабельных и воздушных линий. Основное назначение системы «OVM-3» – организация мониторинга параметров изоляции кабельных и воздушных линий по уровню и распределению частичных разрядов.

СКИ – программа для сбора, хранения и анализа параметров высоковольтного оборудования. Система контроля изоляции (СКИ) – аппа-

ратно-программный комплекс, состоящий из программы (базы данных) и модулей (приборов) различных серий. Основное назначение программы – сбор, хранение и анализ параметров высоковольтного оборудования, полученных при помощи приборов фирмы «Димрус».

Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов:

VMD-10 – универсальный прибор контроля тангенса угла потерь и частичных разрядов в изоляции высоковольтных трансформаторов, кабельных линий, элегазового оборудования.

PLD-Oil – переносная лаборатория для измерения изоляционных параметров масла. Переносная лаборатория «PLD-Oil» (Portable Laboratory Diagnostic – Oil) предназначена для проведения оперативной комплексной оценки параметров технического состояния изоляционного масла.

UP-500 – устройство присоединения для оперативного контроля параметров высоковольтных вводов.

Устройство присоединения марки «UP-500» предназначено для организации периодического мониторинга состояния изоляции высоковольтных вводов трансформаторов и другого оборудования. Одной из главных проблем на сегодняшний день, это внедрение нового оборудования в производство и его диагностирование в процессе эксплуатации. В настоящее время ведутся разработки по созданию мобильных установок диагностики и испытаний высоковольтного оборудования. Но эти установки не дают полной картины о состоянии испытуемого объекта, так как определяют лишь малую часть необходимых параметров.

Для того, чтобы более точно определить состояние оборудования, необходимо создавать такие автоматизированные комплексы, которые будут охватывать максимальное количество параметров оборудования.

Так же необходимо создать всеобщую базу данных по мониторингу и испытаниям оборудования для того, чтобы при вынесении оценки основываться не только на полученных данных, но и на опыте других учреждений, которые занимаются испытаниями.

Библиографический список

1. **Испытательные** и электрофизические установки. Техника эксперимента: учеб. пособие для вузов / В.А. Авруцкий, И.П. Кужекин, Е.Н. Чернов. – М.: МЭИ, 1983. – 262 с.
2. **Техника** высоких напряжений: курс лекций / В.Ф. Вазов, В.А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
3. **Техника** высоких напряжений: учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / К.Ф. Степанчук, Н.А. Тиняков. – Мн.: Выш. школа, 1982. – 367 с.
4. **Высоковольтное** испытательное оборудование и измерения / под ред. А.А. Воробьева. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 584 с.
5. **Техника** высоких напряжений / под ред. М.В. Костенко. – М.: Выш. ш., 1973. – 528 с.

*Т.Е. Шадриков, маг.; рук. В.Ф. Воробьев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Изоляция высоковольтных кабелей в условиях эксплуатации подвергается действию рабочего напряжения и перенапряжений, обусловленных грозowymi и коммутационными воздействиями. От надежной работы систем кабельного электроснабжения зависят промышленные предприятия, бытовые потребители. Возможность надежной работы изоляции кабелей в условиях рабочих напряжений и перенапряжений определяется в ходе испытаний электрической прочности изоляции [1, 2, 3].

Наиболее удобными и перспективными в эксплуатации являются кабели с экструдированной пластмассовой изоляцией. Наибольшее распространение получили силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабели, XLPE-кабели). Эксплуатационные преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена обусловили повсеместное их применение в развитых странах и заметное сокращение использования других типов силовых кабелей в распределительных сетях. В процессе эксплуатации силовые кабельные линии (КЛ) подвергаются одновременному воздействию множества различных факторов, влияющих на состояние изоляции. Старение изоляции силовых кабелей в результате длительного воздействия эксплуатационных факторов может привести к пробоем кабелей при достижении предельных значений характеристик изоляции. Испытания изоляции производят коммутационными импульсами или напряжением промышленной частоты, по результатам которых можно судить о возможности изоляции выдерживать перенапряжения. Метод испытания напряжением промышленной частоты основан на применении испытательного напряжения синусоидальной формы [4]. Принципиальная схема установки по испытанию изоляции высоким напряжением промышленной частоты показана на рис. 1. Основным источником испытательного напряжения промышленной частоты является высоковольтный трансформатор – 3, либо каскад, состоящий из нескольких соединенных последовательно трансформаторов. Мощность установки должна обеспечивать постоянство напряжения на объекте при проведении испытаний. Напряжение на первичной стороне изменяется регулятором напряжения – 1 и контролируется вольтметром – 2. В свою очередь регулятор напряжения должен обеспечивать скорость подъема напряжения, предписанную ГОСТом на испытания, и быть согласован с мощностью объекта испытаний. Сопротивление 4, 9 несут демпфирующий характер, со-

противление 6 используется как шунт для измерения тока утечки при испытаниях. Делитель напряжения 7, 8 используется для контроля формы выходного напряжения, шаровой разрядник 10 для измерения напряжения на объекте испытания. Принципиальная схема установки по испытанию изоляции высоким напряжением промышленной частоты показана на рис. 1.

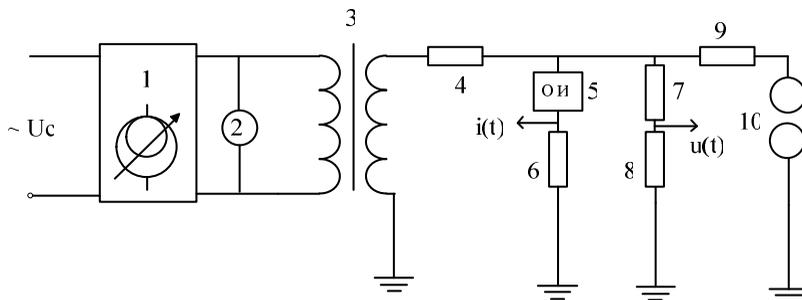


Рис. 1. Блок схемы испытательной установки: 1 – регулятор первичного напряжения, 2 – вольтметр, 3 – испытательный трансформатор, 4 – защитное сопротивление, 5 – объект испытаний, 6 – шунт, 7, 8 – делитель напряжения, 9 – демпфирующее сопротивление, 10 – шаровой разрядник

Актуальной в настоящее время проблемой является испытания кабелей в СПЭ-изоляции, в которых применим только метод СНЧ либо испытания промышленной частотой, ввиду их неразрушающего воздействия на полимерную изоляцию [6]. Из-за большой ёмкости объектов испытания, инженерам пришлось отказаться от создания портативной высоковольтной установки с частотой 50 Гц и ограничиться частотой 0.1 Гц и ниже (СНЧ). Показанная на рис. 1 установка, в зависимости от класса напряжения объектов испытаний, требует отдельного высоковольтного зала и крупногабаритного оборудования. Проблема создания компактного испытательного источника повышенного напряжения промышленной частоты решается в настоящее время. Создание малогабаритного источника высокого напряжения промышленной частоты позволит производить мобильные испытания кабельных линий с помощью актуальных в настоящее время передвижных лабораторий. По причине отсутствия современного, недорогого, компактного источника повышенного напряжения промышленной частоты, сейчас в мобильных испытательных лабораториях применяются СНЧ-установки и стандарты для полевых портативных испытаний, произведенные в Германии (Seba KMT) и США (HV Inc.) и др. Блок – схема портативной испытательной установки для испытаний силовых кабелей с различными видами изоляции (в т.ч. СПЭ-

кабелей) повышенным напряжением представлена на рис. 2. На объекте испытания формируется заданное оператором напряжение – либо постоянное, либо с частотами от сверхнизких до промышленной. Преобразование частоты и повышение напряжения до требуемого осуществляется в блоках 1, 2, 3. Согласование ёмкости испытуемого объекта с выходным напряжением осуществляется путем обратной связи и измерительной системы.

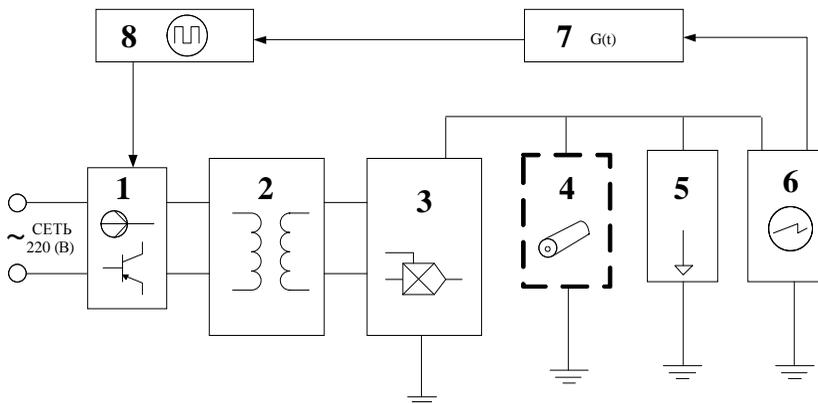


Рис. 2. Блок схемы испытательной установки: 1 – преобразователь напряжения, 2 – высокочастотный трансформатор, 3 – умножитель напряжения, 4 – объект испытания, 5 – устройство разрядки, 6 – блок измерений, 7 – блок обратной связи, 8 – задающий генератор

В условиях массового перехода на испытания кабелей переменным напряжением возникнет потребность в отечественных недорогих, компактных, не уступающих зарубежным аналогам установках повышенного переменного напряжения. Одна из первых таких установок уже создается в стенах ИГЭУ, в настоящее время принцип работы и исполнение установки отрабатываются в системе моделирования MATLAB/Simulink и после предварительных испытаний планируется создание опытного образца и коммерциализация проекта.

Библиографический список

1. ГОСТ 18140-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия.
2. ГОСТ 16442-80. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия.
3. ГОСТ 433-73. Кабели силовые с резиновой изоляцией. Технические условия.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ ЭП). Утв. Министерством энергетики РФ 13 января 2003 г.
5. IEEE 400.2, Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF); The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – Sep. 23. – 2004.

*А.Н. Шапков, магистр; рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КАБЕЛЕЙ

Высоковольтный кабель предназначен для передачи и распределения электроэнергии большой мощности, на напряжении свыше 35 кВ. Высоковольтные кабели требуют в своей конструкции наличие таких элементов, которые обязаны обеспечить надежность, долговечность использования, обладать высокими механическими и диэлектрическими свойствами. Изоляция в таких кабелях может быть бумажно-масляной, либо из сшитого полиэтилена. Преимуществами высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена являются высокий ток термической устойчивости при коротком замыкании, низкий вес, меньший диаметр и радиус изгиба, что облегчает прокладку кабеля как в кабельных сооружениях, так и в земле на сложных трассах, требуется меньших расходов при реконструкции и содержании кабельных линий, большие строительные длины. Силовые кабели состоят из следующих основных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Кроме основных элементов в конструкцию кабеля могут входить экраны, жилы защитного заземления и заполнители. Переход на кабели с изоляцией из СПЭ взамен кабелей с БПИ обусловлен рядом неоспоримых преимуществ: более высокая надёжность в эксплуатации; меньшие расходы на реконструкцию и содержание кабельных линий; низкие диэлектрические потери (коэффициент диэлектрических потерь 0,001 вместо 0,008); высокая стойкость к повреждениям; большая пропускная способность за счёт увеличения допустимой температуры нагрева жил: длительной (90 вместо 70 °С), при перегрузке (130 вместо 90 °С); более высокий ток термической устойчивости при коротком замыкании (250 вместо 200 °С); низкая допустимая температура при прокладке без предварительного подогрева (-20 вместо 0 °С); низкое влагопоглощение; меньший вес, диаметр и радиус изгиба, что облегчает прокладку на сложных трассах; возможность прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней; более экологичный монтаж и эксплуатация (отсутствие свинца, масла, битума).

При производстве кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена используются две технологии сшивания изоляции:

1. технология пероксидной сшивки на линиях газовой вулканизации для кабелей среднего (10 – 35 кВ) и высокого напряжений (110кВ);
2. технология сшивки силаном для кабелей низкого и среднего напряжения от 0,66 до 20 кВ.

Полиэтилен обладает химической стойкостью к кислотам, щелочам, растворам солей и органическим растворителям. Однако полиэтилен под воздействием ультрафиолетовых лучей становится хрупким и теряет свою прочность. Под действием ультрафиолетового излучения происходит фотодеструкция полиэтилена. Так же проблемой кабелей с полимерной изоляцией является огнестойкость.

Кабели высокого и сверхвысокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена, представляющие собой трехфазную систему из кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена однофазного исполнения, эксплуатируются, как правило, при заземлении экранов по концам строительных длин. Но в этом случае ток через экран составляет 62 % от тока в жиле, что недопустимо для экрана, сечение которого по различным причинам обычно меньше сечения жилы. Поэтому для кабелей из СПЭ используют способ одностороннего заземления экранов в конце каждой строительной длины кабеля путем применения специальных изолирующих муфт либо электромагнитную компенсацию с применением транспозиции экранов.

В 2011 году в России было произведено 388,4 тыс. т кабельно-проводниковой продукции, что на 30% меньше объема производства 2010 года. В настоящее время большая часть кабелей на напряжение 6 – 35 кВ производится с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Так, в 2009 году доля БПИ составила примерно 83 %, оставшаяся часть приходится на сшитый полиэтилен. Несмотря на существенные преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), их доля в общем объеме производства силовых кабелей на напряжение 6 – 35 кВ небольшая и за последние три года практически не выросла. Это объясняется тем, что основное потребление кабеля приходится на проведение ремонтных работ. А при проведении ремонта КЛ, где используется бумажно-пропитанная изоляция, в большинстве случаев вырезанный участок заменяют ему подобным, т.е. на кабель с БПИ.

Поскольку преимущества изоляции из сшитого полиэтилена как отдельного элемента линии не могут существенно улучшить показатели всей линии, они должны рассматриваться в комплексе со всей КЛ. При строительстве новых КЛ используются в основном кабели с СПЭ-изоляцией. Но, как и у любой технологии, у кабеля с изоляцией из СПЭ есть свои недостатки. Так, допустимые токовые нагрузки, указанные в рекламных проспектах на кабельную продукцию, как правило, не соответствуют фактическим значениям при эксплуатации. Например, тот факт, что длительно допустимая рабочая температура токопроводящих жил кабеля с изоляцией из СПЭ составляет 90 °С, является завышенной для реальных условий эксплуатации. Кабели с полимерной изо-

ляцией, как и кабели с бумажной пропитанной изоляцией, способны впитывать влагу через многопроволочную жилу (зафиксированы случаи, когда влага проникала на расстояние до 60 метров по длине кабеля), что недопустимо. В связи с этим формируется потребность в силовых кабелях с водоблокирующими элементами по жиле. Также существует необходимость в усилении оболочки ребрами жесткости не только на конструкциях на напряжение 110 кВ, но и на кабелях среднего напряжения, поскольку наличие дефектов в оболочке и повышенная кислотность почвы приводят к разрушению кабеля. Для обеспечения механической прочности оболочки при прокладке предъявляются повышенные требования и к полимерной композиции, твердость которой должна быть не ниже 55 единиц по Шору. Кабели с изоляцией СПЭ — очень деликатная конструкция, и каждому производителю следовало бы держать обратную связь с монтажными организациями — проводить семинары и обучение работе с кабелем нового поколения.

Библиографический список

1. **Бабенко, С.А.** Гранулирование дисперсных материалов в жидких средах (Элементы теории, практики, перспективы применения) / С.А. Бабенко, О.К. Семакина, В.М. Миронов. – Томск: Инс-т оптики атмосферы СО РАН, 2003. – 346 с.
2. **Тугов, И.И.** Химия и физика полимеров / И.И. Тугов, Г.И. Кострыкина. – М.: Химия, 1984. – 152 с.
3. **Ценообразование** и сметное нормирование в строительстве. – 2010. – № 11.
4. **Технические** проблемы при эксплуатации кабелей ВН с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабель-news. – 2010. – № 4.
5. **Инструкция** по прокладке кабелей силовых с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20 и 35 кВ. РУКАВ/ID 23-2-019. – АВВ Москабель.
6. **Инструкция** по охране кабельных линий. – АВВ Москабель.
7. **Кабели** силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 1, 6, 10, 20, 35, 64/110 кВ. – 3-е изд. – ОАО «Электрокабель» Кольчугинский завод.

*Ю.А. Яльцева, маг.; рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Одной из основных составных частей современных электрических систем являются силовые трансформаторы (СТ), суммарная мощность которых из-за многократной трансформации электрической энергии

в 5 – 6 раз превышает генераторную мощность. На работу данной функциональной единицы сети оказывают влияние такие факторы, как грозовые и коммутационные перенапряжения, повышение рабочего напряжения из-за некомпенсированной емкости ВЛ СВН и УВН. Длительное повышение напряжения становится в последнее время весьма актуальным. Большое внимание в последнее время уделяется сейсмостойкости мощных трансформаторов, разработке методов испытания их на сейсмостойкость. Воздействия геомагнитных токов на трансформатор. Дефекты могут возникать как в обмотках, магнитопроводе, так и в системе охлаждения (СО), устройстве РПН, прочих узлах. Заметную долю повреждений составляют проявления динамической нестойкости обмоток к КЗ. Увлажнение и старение изоляции, в первую очередь бумажно-масляной, во многом определяет срок службы этого ответственного вида оборудования.

Повреждения трансформаторов происходят из-за появления местных дефектов. Поэтому и методы диагностики должны позволять выявлять местные дефекты, а не только распределенные, как это имеет место в существующей системе диагностики. Необходимо исключать из системы диагностики методы, основанные на интерпретации косвенных измерений или не дающие однозначных сведений. К их числу можно отнести, например, тангенс угла диэлектрических потерь – $\text{tg}\delta$. Этот показатель, исторически использующийся для оценки текущего состояния изоляции, может быть «нормальным» для изоляции находящейся в неудовлетворительном состоянии и наоборот. В то же время $\text{tg}\delta$ обусловлен физико-химическим составом и, следовательно, может быть определен без электрических испытаний.

Одним из наиболее эффективных методов диагностики дефектов конструкции является тепловизионный контроль. Переход силового трансформатора в предельное состояние обусловлен двумя основными причинами: наличием опасных деформаций обмоток и износом витковой изоляции обмоток. С помощью хроматографического анализа газов в силовых трансформаторах можно обнаружить две группы дефектов: перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова; электрические разряды в масле. Применяется методика критериев. Получаемые по отношению концентраций газов признаки имеют достаточно условную диагностическую ценность, так как они ориентированы на определение характера развивающегося дефекта после превышения установленных граничных концентраций хотя бы у одного углеводородного газа или водорода. Статистический анализ показал, что наибольшую диагностическую ценность имеет методика МЭК (ГЭС 60599) [4], которая и рекомендована к применению.

Перспективным методом химического анализа жидкой и твердой изоляции трансформаторов является спектроскопия. Современные дос-

тижения в области электроники и оптики позволяют конструировать малогабаритные спектрометры, которые можно использовать для экспресс исследований в полевых условиях. использование в практике энергосистем такого показателя как окисленность масла взамен кислотного числа. Спектральный анализ может применяться и для определения состояния твердой изоляции.

Комплексный подход к оценке состояния электрической изоляции маслонаполненных трансформаторов опирается на 53 показателя, которые рекомендованы к применению, для обеспечения объективности их диагностирования. Методы измерения контролируемых показателей отличаются широким разнообразием.

В сложившейся практике обследования работающих трансформаторов нет универсального метода для определения его работоспособного состояния. Метода, который бы отвечал требованиям: экономичности, скорости, достоверности, возможности автоматизации, обследованию оборудования без отключения.

Для эффективной постановки диагноза система может накапливать базу данных большого объема, на практике содержащую сотни «правил», составленных высококвалифицированными экспертами. База данных в эксплуатирующих организациях должна непрерывно пополняться, корректироваться по мере накопления опыта.

Основой для принятия решений о возможности и целесообразности продолжения эксплуатации силовых трансформаторов, отработавших установленный срок службы, является состояние основных элементов: сердечника и обмоток, включая все элементы их твердой изоляции.

Создание исчерпывающих по полноте алгоритмов постановки диагноза представляет собой чрезвычайно сложную, часто неразрешимую задачу из-за трудностей алгоритмизации учета таких факторов, как предыстория эксплуатации объекта контроля, опыт работы подобных объектов, множества влияющих на оценку состояния факторов, связанных взаимными ассоциативными связями.

Построение правил и моделей ситуации при решении задач оперативной диагностики представляет большие трудности и практически без использования знаний высококвалифицированных экспертов обойтись нельзя. Система экспертных оценок приобрела большое значение именно для постановки диагноза при оценке состояния оборудования. Это объясняется тем, что для решения сложных, многофакторных задач в них используются базы знаний большого объема, содержащие результаты опыта, накопленного высококвалифицированными специалистами.

Совершенно новым предложением в диагностике является применение рангового анализа в качестве метода диагностирования силовых

трансформаторов. Ранговое параметрическое распределение характеристики главной изоляции позволяет более гибко оценить ее состояние и спрогнозировать поведение на последующем интервале времени. Выявленные отклонения параметров изоляции с помощью рангового анализа, свидетельствующие об ослаблении изоляционной системы в трансформаторе, подтверждаются результатами ХАРГ и физико-химическими анализами.

Известно, что физико-химический анализ трансформаторного масла, накапливающего в себе информацию о происходящих в эксплуатируемом трансформаторном оборудовании процессах, являющихся следствием ухудшения состояния изоляционной и теплоотводящей систем, позволяет выявлять более 60 % его возможных дефектов. Разработка комплексной оценки СТ на данный момент не имеет четких очертаний. Предлагается создать такой критерий, который сможет комплексно и точно оценить состояние работающего силового трансформатора. Например, взять за основу такие физико-химические факторы, как увлажнение, влияние внешних факторов на механическую прочность изоляции и т.д. Привести измерения к единой системе, которая позволит на определенном этапе «жизни» трансформатора, применять определенные методы измерения его технического состояния. Но недостаточность накопленных данных, пока не позволяет точно определить какими методами следует пользоваться на различных этапах работы СТ, а от каких отказаться. Также вызывает немалую трудность соотнести данные разных предприятий о состоянии СТ из-за большого разнообразия применяемых методов диагностики технического оборудования.

Библиографический список

1. <http://www.energo-info.ru>.
2. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
3. <http://0380.ru>.
4. ИСО/МЭК 599-78.
5. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – М.: ПАО «ЕЭС России», 2000.
6. МЭК 61198.
7. <http://forca.ru/stati/podstancii/teplovizionnyy-kontrol-silovyh-transformatorov.html>.
8. ПТЭ «Рекомендации по проведению тепловых испытаний силовых масляных трансформаторов (и автотрансформаторов) на месте их установки». – 1972.
9. РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасной диагностики электрооборудования / ДСРиНТП ПАО «ЕЭС России». – М., 1999.
10. <http://www.transform.ru/sst/usege/ss/alexeev/oee.htm>.
11. **International Standard**, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. IEC60599.

12. **Методы** и аппаратура определения мест повреждений в электросетях: аналитический обзор. – Казань: ИЦ «Энергопрогресс», филиал ОАО «Татэнерго», 2002. – 152 с.

13. **Компьютерная** система диагностики изоляции силовых трансформаторов по акустическим сигналам частичных разрядов / Ю.С. Пинталь [и др.] // Актуальные проблемы электронного приборостроения: тр. IV междунар. конф. – Новосибирск, 1998. – Т. 8. – С. 52.

14. **Современная** система контроля и диагностики состояния изоляции трансформаторов тока в эксплуатации / О.Н. Гречко, А.Ф. Курбатова // Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем: 2-й науч.-техн. семинар. – М.: АСКОН, 2001.

15. **Коростелев, А.А.** Пространственно-временная теория радиосистем: уч. пособие для ВУЗов / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1986. – 320 с.

*С.В. Воробьев, маг.; рук. М.Е. Тихов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВЛЭП

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП), как и все оборудование электроэнергетических систем, защищают от воздействия молний [1]. Основным элементом грозозащиты ВЛЭП являются металлические тросы, монтируемые на опорах выше фазных проводов. В процессе эксплуатации металлические грозозащитные тросы ВЛЭП стареют (прежде всего из-за коррозии) и требуют замены. Несвоевременная замена металлического грозозащитного троса приводит к его обрыву и аварийным отключениям ВЛЭП. В настоящее время по данным [2] такие аварии с тросами приводят в среднем к одному устойчивому отключению в год на 1000 км линии, что соизмеримо с аварийностью гирлянд изоляторов. Экономические трудности, связанные с финансированием ремонтных работ на электропередачах, приводят часто к принятию необоснованных решений о снятии тросов грозозащиты с ВЛЭП. Однако принятые решения и представленные рекомендации до сих пор не получили должного теоретического обоснования. Так, следует учитывать, что повышение числа отключения вследствие прямых ударов молнии в ВЛЭП, приведет не только к снижению надежности электроснабжения, но и к повреждению подстанционного оборудования и интенсивному износу изоляции. Одним из возможных путей выхода из сложившейся ситуации может стать использование коррозионностойких грозозащитных тросов на полимерной основе. Однако материалы с подобными характеристиками, как правило, имеют повышенное удельное активное сопротивление. По этой причине

необходимо провести анализ влияния величины активного сопротивления троса на грозоупорность ВЛЭП.

Методика расчета основывается на математической модели троса с распределенными параметрами, в которой принят ряд допущений:

1. Трос однороден, и каждый участок имеет одинаковые параметры;
2. При распространении волны напряжения по тросу не учитывается эффект короны;
3. Токи утечки по изоляции ВЛЭП равны нулю.

С учетом принятых допущений, грозозащитный трос может быть представлен в виде схемы замещения, в которой множество соединенных в цепочку элементов dx имеют сопротивление $r_0 dx$, индуктивность $L_0 dx$, емкость $C_0 dx$.

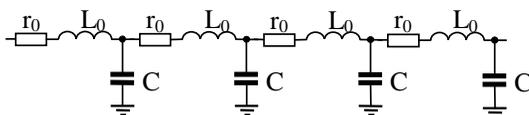


Рис. 1. Схема замещения грозотроса с распределенными параметрами

Мгновенные значения тока и напряжения в начале выбранного участка обозначим u и i , а в конце участка – $(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx)$ и $(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx)$. Тогда математическая модель троса, описывающая изменение напряжений и токов в пространстве и времени, представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; & (1) \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. & (2) \end{cases}$$

Для решения системы дифференциальных уравнений приведенную систему уравнений необходимо преобразовать в дифференциальное уравнение относительно i . Продифференцировав уравнение (2) по t , получим:

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = C_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Подставив в (3) уравнение (1) и выполнив преобразования получим гиперболическое дифференциальное уравнение второго порядка или волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = r_0 C_0 \frac{\partial i}{\partial t} + L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Для нахождения изменяющегося во времени распределения тока молнии вдоль грозозащитного троса воспользуемся численными методами решения. Для этого уравнение (4) приведем к простому алгебраическому уравнению, воспользовавшись разностной схемой, т. е. заменив производные разностями. После замены производных разностями уравнение (4) примет следующий вид:

$$\frac{i'_{x+1} - 2i'_x + i'_{x-1}}{h^2} = r_0 C_0 \frac{i'_x - i'^{-1}_x}{\tau^2} + L_0 C_0 \frac{i'^{t+1}_x - 2i'_x + i'^{t-1}_x}{\tau^2}. \quad (5)$$

Разрешив это уравнение, относительно i'^{t+1}_x , получим явную схему решения неоднородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$i'^{t+1}_x = (2i'_x + i'^{t-1}_x) - \frac{r_0}{L_0} (i'_x - i'^{t-1}_x) \tau + \frac{1}{L_0 C_0} \frac{(i'_{x+1} - 2i'_x + i'_{x-1}) \tau^2}{h^2}. \quad (6)$$

Проведенные расчеты показали, что при повышении активного погонного сопротивления грозозащитного троса происходит снижение, амплитуды и крутизны волны тока при подходе ее к опоре (рис. 2).

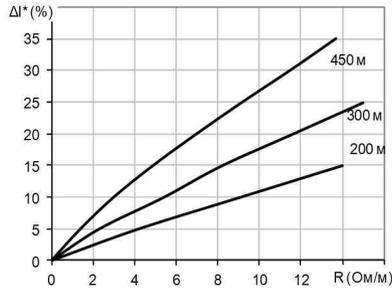


Рис. 2. Зависимость относительного снижения амплитуды тока молнии: $(\Delta I^* = 1 - I_R/I)$ на подходе к опоре от удельного активного сопротивления грозозащитного троса при различных длинах пролета ВЛЭП

Снижение амплитуды волны тока происходит за счет активных потерь в проводе, которые расходятся на нагрев провода. Поскольку активное сопротивление является удельным параметром на единицу длины, то на величину снижения амплитуды волны также влияет и длина пролета (см. рис. 2). При пробеге волны тока по тросу с повышенным активным сопротивлением изменяется также крутизна фронта тока молнии. Изменение крутизны фронта волны тока объясняется физическими процессами, аналогичными процессам, происходящим с фронтом волны при наличии короны на проводе (рис. 3). Предположим, что волна тока

состоит из множества волн с малыми амплитудами наложенных друг на друга с малым отставанием по времени. Через небольшой промежуток времени после пробега волной некоторого расстояния, амплитуда тока каждой волны снизится за счет активных потерь в тросе, а отставание по времени останется неизменным (см. рис. 3). Таким образом, при неизменной длине фронта снижение амплитуды тока волны приведет к снижению крутизны фронта волны тока.

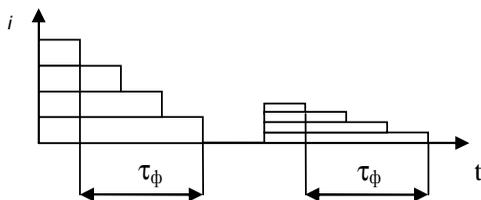


Рис. 3. Пояснения к процессу уменьшения крутизны волны тока

В соответствии с принятой методикой расчета грозоупорности [3] общее число отключений на 100 км и 100 грозовых часов ВЛЭП от удара молнии, рассчитывается по следующей формуле:

$$n_c = n_{on} + n_{mp} + n_{np}, \quad (7)$$

где n_{on} – число отключений при ударе молнии в опору; n_{mp} – число отключений при ударе молнии в трос; n_{np} – число отключений при прорыве молнии на провод.

Для оценки практического значения влияния активного сопротивления грозозащитного троса, произведен расчет числа отключений ВЛЭП, с учетом активных потерь в тросе. Расчет грозоупорности произведен на примере ВЛ 110 кВ на металлических опорах типа ПБ-110-1 защищенной тросом со следующими характеристиками: высота опоры 24,8 м, средняя высота подвеса провода, 18 м, средняя высота подвеса тросов 22 м, сопротивление заземления 10 Ом, защитный угол 35°.

Расчеты показывают, что при повышении удельного активного сопротивления грозозащитного троса до величины $R_{TP} = 14$ (Ом/м), число отключений ВЛЭП при ударе молнии в середину пролета снижается на 50 %.

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ-7). – 7-е изд. – М.: Юрайт, 2007. – 399 с.
2. **Об эффективности** грозозащитных тросов ВЛ / А.Ф. Дьяков, Р.Я. Федосенко // Электрические станции. – 1991. – № 9. – С. 66 – 72.
3. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений.

Содержание

Секция 16. Электротехника и электротехнологии

<i>Канафеев Р.И., Жеваев М.С., Танаев А.В.; рук. Мякишев В.М.</i> Динамика процесса повторного возбуждения сварочной дуги	3
<i>Домаров П.В., Афиногентова А.Г.; рук. Алиферов А.И.</i> Плазменная электротехнология переработки техногенных отходов	6
<i>Радько С.И., Творогов С.И.; рук. Анышаков А.С.</i> Анализ некоторых типов конструкций составного электрода пароводяного плазмотрона мощностью до 100 кВт	9
<i>Гежа К.Е., Замосковцев А.В., Колупаева А.С.; рук. Алиферов А.И., Сеницын В.А.</i> Распределение мощности нагревателей по длине электропечи сопротивления непрерывного действия	12
<i>Журова А.Ю.; рук. Горева Л.П.</i> Исследование влияния несимметрии параметров вторичного токоподвода на электрические характеристики дуговых сталеплавильных печей	16
<i>Творогов С.И.; рук. Горева Л.П.</i> Исследование индуктивного сопротивления шихтованных пакетов шин прямоугольного сечения руднотермических печей	20
<i>Гонжара Т.В.; рук. Горева Л.П.</i> Моделирование динамических свойств электродо-держателей дуговых сталеплавильных электропечей	23
<i>Ермошкина А.Ю.; рук. Горева Л.П.</i> Исследование собственных электрических сопротивлений ферромагнитных изделий при электроконтактном нагреве	26
<i>Кузнецов А.А.; рук. Сайкин М.С.</i> Особенности технологического оборудования для электромагнитного перемешивания легированной стали	29
<i>Сухов Д.А., рук. Марков М.Г.</i> Разработка системы управления для источника питания для аргодуговой сварки	31
<i>Кац П.В.; рук. Кинит Н.В.</i> О диагностировании электрических цепей при отождествлении некоторых неизвестных параметров	36
<i>Пшеничникова Е.Е., Новиков В.И., Мянин М.А.; рук. Куликов К.В.</i> Разработка комплекса лабораторных работ по курсу «Электротехника» для стендов ЭОЭ1-С-К	40
<i>Савельев Н.В.; рук. Рожков В.В.</i> Преимущества трехуровневой схемы асинхронного частотно-регулируемого электропривода с активным фильтром гармоник	41
<i>Корнеев В.В.; рук. Приступ А.Г.</i> Проектирование генератора для беспилотного летательного аппарата	45
<i>Степанов Е.А.; рук. Бояринов Г.И.</i> Анализ преобразования методики проектирования ДПТ серии 2П в методику проектирования ДПТ серии 4П	47
<i>Корнеев В.В.; рук. Приступ А.Г.</i> Особенности расчёта двигателей с постоянными магнитами при помощи пакета SPEED	49
<i>Алейников А.В.; рук. Мартынов В.А., Голубев А.Н.</i> Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами на основе численного метода расчёта поля в активной зоне	51
<i>Морозова Д.Ю.; рук. Сайкин М.С.</i> Расчётное и экспериментальное исследование силы взаимодействия «закрытых» постоянных магнитов	55
<i>Русанов М.Р.; рук. Топоров А.В., Топорова Е.А.</i> Разработка радиального комбинированного магнитожидкостного уплотнения и исследование его магнитных характеристик	58
<i>Антоненко А.Е., Беляев А.Н.; рук. Шеманаева Л.И.</i> Портативное зарядное устройство	60
<i>Благин А.А.; Шеманаева Л.И.</i> Управляемый диодный светильник на микроконтроллере ATMEGA8	61
<i>Киямутдинова А.Р.; рук. Борисов А.Н.</i> Цветовая температура светодиодных ламп	63
<i>Егоров М.С.; рук. Кондратьев А.В.</i> «Интеллектуальные» решения в области энергосбережения	64

<i>Казанов М.С.; рук. Кондратьев А.В.</i> Внедрение источников распределенной генерации в систему электроснабжения промышленного предприятия	67
<i>Чижикова Н.В.; рук. Манин А.В.</i> Повышение энергоэффективности комплекса установок по выращиванию монокристаллов	70
<i>Фролов А.В.; рук. Щучкина Е.А., Свишчина Г.М.</i> Испытание ламп ДРЛ250М в режиме повышенной мощности горения	72
<i>Мамонв А.А.; рук. Свишчина Г.М., Щучкина Е.А.</i> Исследование ламп ДНаТ250 с двумя горелками и определение эффективности их использования	76
<i>Волков В.В., Долгих И.Ю.; рук. Королёв А.Н.</i> Частотные характеристики ферромагнитных материалов	80
<i>Волков В.В., Долгих И.Ю.; рук. Королёв А.Н., Орлов А.С.</i> Исследование ферромагнитных материалов при нагреве	83
<i>Корнилов К.Е.; рук. Макаров А.В.</i> Исследование феррорезонансных явлений на подстанции «Бескудниково»	87
<i>Демиденко О.В., Заякина А.А.; рук. Сайкин М.С.</i> Численное исследование магнито-жидкостного герметизатора газовых сред	91

Секция 17. История электротехники

<i>Пахомова С.В.; рук. Мартынов В.А.</i> История изобретения трансформатора	94
<i>Закорюкина Л.М.; рук. Мартынов В.А.</i> Неизвестные герои войны токов	97
<i>Аргунов А.Р., Тимонов М.А.; Киселев В.М.</i> Исторические стержни развития электроэнергетики Якутии	99
<i>Басова А.Е.; рук. Сайкин М.С.</i> Постоянные магниты: история создания и применения	103
<i>Любимова А.О.; рук. Мартынов В.А.</i> История развития электроэнергетики в Ивановской области	106
<i>Сидорова Л.В.; рук. Сайкин М.С.</i> Свет в моем окошке	108
<i>Пробичева А.А.; рук. Мартынов В.А.</i> «Лейденская банка»: история создания конденсаторов	111
<i>Попова Е.А.; рук. Мартынов В.А.</i> Распределённая генерация: перспективы и проблемы	115
<i>Ильина Я.В.; рук. Мартынов В.А.</i> Электростанции на топливных элементах – ячейках	118
<i>Созинов М.А.; рук. Макаров А.В.</i> История развития линий и вставок постоянного тока. Перспективы их применения в России	120
<i>Шутенко А.А.; рук. Макаров А.В.</i> След в истории, как смысл в жизни...	122
<i>Судакова Д.А.; рук. Макаров А.В.</i> «Великая математическая поэма» Жозефа Фурье	124
<i>Докучаев А.Ю., Пирожкова Ю.А.; рук. Макаров А.В.</i> Перспективы использования высоковольтных линий электропередач постоянного тока	126
<i>Пеицорова С.А.; рук. Макаров А.В.</i> IСIGRE : вчера, сегодня, завтра	131

Секция 18. Электрооборудование и режимы электрических станций и подстанций

<i>Страхов А.С.; рук. Калачева О.Н.</i> Результаты исследования режимов нейтральной электрических сетей на компьютерной модели	134
<i>Чижеский А.М.; рук. Бладыко Ю.В.</i> Расчет статики проводов распределительных устройств и отпаек к электрическим аппаратам	137
<i>Страхов А.С., Новосёлов Е.М., Литвинов С.Н.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка алгоритма автокоррекции времени записи сигнала	141
<i>Вахрин М.В.; Рассказчиков А.В.</i> Анализ исполнения КРУЭ	145
<i>Константинов Д.И.; Михеев Г.М.</i> О временных параметрах переключения быстродействующих регуляторов напряжения под нагрузкой	149
<i>Абдуллаева С.А.; рук. Мурадалиев А.З.</i> Количественная оценка остаточного ресурса выключателей	151

<i>Исмаилова С.М.; рук. Рафиева Т.К.</i> Возможности улучшения технического состояния силовых трансформаторов	155
<i>Кротиков А.А., Глотова Н.В.; рук. Савельев В.А.</i> Анализ перспективных стратегий в России и за рубежом	159
<i>Сталович В.В.; рук. Радкевич В.Н.</i> Контроль технического состояния силовых трансформаторов подстанций напряжением 6 – 20/0,4 кВ	163
<i>Сабузов А.Г.; рук. Баженов И.А.</i> Обзор конструктивных особенностей и опыта эксплуатации ИТГ 330 – 750 кВ	166
<i>Еремеев А.С., Литвинов С.Н.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Анализ методов диагностирования витковых замыканий в обмотке статора асинхронного электродвигателя	168
<i>Васильченко Н.С.; рук. Сульниченко И.Н.</i> Изменение подхода к выбору схем распределительных устройств ГЭС	171
<i>Демьянова И.Н.; рук. Сульниченко И.Н.</i> Анализ надежности оборудования распределительных устройств	175
<i>Ушанов И.А.; рук. Баженов И.А.</i> Кабели из сшитого полиэтилена	178
<i>Дятлова Е.А.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Техничко-экономическое обоснование проекта применения ретрофита или нового строительства при модернизации РУ-10 кВ ОАО «АвтоВАЗ»	179
<i>Наливайко М.В.; рук. Савельев В.А.</i> АСУТП электрической части электростанций на базе ПТК КВИНТ	184
<i>Груздова М.С.; рук. Савельев В.А.</i> Анализ систем мониторинга силовых трансформаторов	188
<i>Беликов М.А.; рук. Савельев В.А.</i> Характеристики электрооборудования компании ALSTOM	189
<i>Авлоева И.Б., Киямов Р.Р.; рук. Савельев В.А.</i> Методика оценки технического состояния измерительных трансформаторов напряжения	192
<i>Свирелин Д.А.; Рассказчиков А.В.</i> Анализ конструктивного выполнения компактного элегазового оборудования	195
<i>Смирнова А.Н.; рук. Савельев В.А.</i> Задачи и функции делительной автоматики на ТЭС	199
<i>Шиков А.В.; рук. Рассказчиков А.В.</i> Анализ надежности вариантов схем выдачи мощности ТЭЦ	201

Секция 19. Высоковольтные электроэнергетика и электротехника

<i>Бородин Е.О.; Константинова С.А.; рук. Вихарев А.В.</i> Создание научно-исследовательской лаборатории диагностики высоковольтных силовых кабелей	205
<i>Иванова А.А.; рук. Митькин Ю.А.</i> Выбор рациональной системы контроля технического состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов	210
<i>Лоскутов В.В.; рук. Словесный С.А.</i> Установка для регистрации частичных разрядов в изоляции	213
<i>Любимов Е.А.; рук. Словесный С.А.</i> Обеспечение электромагнитной совместимости информационно-измерительных средств на энергетических объектах	217
<i>Марюшко Е.А.; рук. Шевченко С.С.</i> Разработка аналогового волоконно-оптического измерительного тракта и исследование его амплитудно-частотных характеристик	220
<i>Уваров А.А., Наумов А.В., Матвеев Н.А.; рук. Митькин Ю.А.</i> Оценка концентрации воды в трансформаторном масле по зависимости его электрической прочности от температуры	223
<i>Мельникова О.С.; рук. Митькин Ю.А.</i> Анализ эффективности традиционных методик определения пробивного напряжения трансформаторного масла в маслоробойнике	226
<i>Мухин С.О.; рук. Митькин Ю.А.</i> Проблемы и перспективы развития высоковольтной испытательной техники	229

<i>Шадриков Т.Е.; рук. Воробьев В.Ф.</i> Сравнительный обзор высоковольтных установок для испытания кабельной изоляции	233
<i>Шашков А.Н.; рук. Митькин Ю.А.</i> Проблемы создания и эксплуатации высоковольтных полимерных кабелей	236
<i>Яльцева Ю.А.; рук. Митькин Ю.А.</i> Проблемы создания новых методов и технических средств диагностики силовых трансформаторов	238
<i>Воробьев С.В.; рук. Тихов М.Е.</i> Перспективы применения полимерных материалов повышенной проводимости для грозозащиты ВЛЭП	242

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ЭНЕРГИЯ-2013»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

Часть 2

*Составитель Макаров А.В.
Компьютерная верстка Фомичевой А.В.
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.
Подписано в печать 29.05.2013. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,65.
Тираж 100 экз. Заказ № .
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.