

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И.Ленина»

Академия электротехнических наук Российской Федерации
Верхнее - Волжское отделение АТН РФ

Организована при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 13-08-06010-г)

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции

«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»

(XVII Бенардосовские чтения)

29-31 мая

I том

Электроэнергетика

Иваново 2013

В I томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области теории и практики электротехники и электротехнологии; электроэнергетических систем; рассмотрены вопросы надежности, эффективности и диагностики электрооборудования станций и энергосистем; вопросы техногенной безопасности в энергетике.

Редакционная коллегия:

Тарарыкин С.В., ректор, д.т.н., профессор, - председатель;

Тютиков В.В., проректор по НР, д.т.н., профессор;

Шуин В.А., каф АУЭС, д.т.н., профессор;

Казаков Ю.Б., зав. каф. ЭМ, д.т.н., профессор;

Полетаев В.А., зав. каф. ТАМ, д.т.н., профессор;

Воробьев В.Ф., зав. каф. ТЭВН, к.т.н., профессор;

Косяков С.В., зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор;

Колибаба В.И., зав. каф. ЭОиП; д.э.н., профессор;

Бушуев Е.Н., зав. каф. АТП, д.т.н., доцент;

Клюнина С.В., начальник УИУНЛ.

ISBN 978-5-89482-874-9

ный

ISBN 978-5-89482-876-3 (Т. 1)

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный

энергетический университет
имени В.И. Ленина», 2013.

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»

УДК 621. 621.365.5

Л.С. ЗИМИН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой,
А.В. БАЙКИН, аспирант
(СамГТУ) г. Самара

Применение индукционного нагрева в промышленных технологиях

Широко распространённые в различных отраслях промышленности процессы обработки металлов методом горячего пластического деформирования, неразрывно связаны с технологией нагрева металла.

Экономическая эффективность выбранного метода нагрева зависит от соотношения между величиной конечной энергии и количеством затраченной первичной энергии. При этом понятие первичной энергии включает в себя всю технологическую цепочку по обеспечению потребителя энергией.

Вследствие уменьшения мировых запасов энергоносителей современный подход к использованию энергии означает ответственную эксплуатацию еще доступных ресурсов. Поэтому непрерывно возрастающие требования к энергосберегающим процессам нагрева должны быть реализованы в промышленности, прежде всего, путем внедрения эффективных технологических процессов. В то же время эти технологии должны удовлетворять ряду экономических критериев, например, высокой производительности при низкой стоимости производства. Для выработки теплоты может быть использована либо электрическая энергия, либо химическая энергия сжигаемого топлива. Решение за или против конкретного источника энергии основывается преимущественно на экономических критериях. По этой причине для термических процессов все шире используется электрическая энергия вследствие непрерывного ужесточения требований к эффективности и экологической чистоте промышленных процессов, к качеству продукции и, не в последнюю очередь, к улучшению общего энергетического баланса производства. Электротермические процессы являются необходимой частью многих промышленных технологий, Электротермические установки очень гибки в работе и предоставляют исключительные возможности для автоматизации, особенно при использовании микропроцессоров. Высокая эффективность процесса нагрева равносильна энергосбережению и автоматически ведет к экономичности технологии.

Экономически эффективным электротермический процесс становится в результате оптимизации. Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, которая направлена, с одной стороны, на проектирование новых, более эффективных и менее дорогостоящих

технических систем и, с другой стороны, на разработку методов повышения качества функционирования существующих систем. Оптимизация даже при небольшом уменьшении затрат приводит к значительному суммарному экономическому эффекту. Она особенно ощутима для массового производства или для объектов с большими капиталовложениями, к которым относятся и технологические комплексы для обработки металлов давлением (ОМД). При этом экономия намного превышает затраты на оптимизацию, на которую целесообразно затрачивать до 15% стоимости проектирования.

Здесь перспективно применение индукционного нагрева, который по экономичности, производительности, уменьшению окалины и угара, уровню автоматизации является вполне конкурентоспособным по сравнению с альтернативными технологиями, основанными на нагреве в печах сопротивления и пламенном нагреве. Поэтому при интенсификации металлургического и металлургического производств встает проблема достижения экстремальных значений технико-экономических показателей технологических комплексов «индукционный нагрев-обработка металлов давлением (ОМД)».

Такие преимущества, как высокая скорость нагрева, обеспечивающая интенсификацию производства и высокую производительность, высокая точность отработки требуемых температурных режимов, уменьшение окалины и угара металла, высокий уровень автоматизации, минимальное влияние на окружающую среду способствуют все более широкому внедрению в промышленность индукционных установок для нагрева металла перед обработкой давлением. В связи с этим наблюдается тенденция роста парка индукционных нагревателей для нагрева заготовок из различных металлов токами промышленной и повышенных частот в кузнечном, прокатном и прессовом производствах.

Основная трудность в формировании экономического критерия оптимизации обусловлена требованием иметь единственный обобщенный показатель, который отражал бы многочисленные частные аспекты. При учете различных аспектов экономической эффективности можно выделить четыре основных фактора, которые при заданных ценах и нормативных показателях однозначно определяют значения подавляющего большинства остальных показателей: количество и качество продукции, а также эксплуатационные и капитальные затраты на ее производство.

Оптимальным является проектное решение, обеспечивающее наибольшую экономическую эффективность производства. Это утверждение справедливо как для технологического комплекса, исходные и конечные продукты которого являются товарными, так и для отдельных процессов и агрегатов. Из всех затрат преобладающее значение имеют затраты на нагрев. Так, расход электроэнергии при индукционном нагреве стали в среднем равен 500 кВт.ч/т, алюминия - 280 кВт.ч/т.

Расход энергии на деформацию, если взять два основных вида ОМД в металлургии - прокатку и прессование, составит для обжимных станков: для стали – 12-30 кВт·ч/т, для алюминия – до 80 кВт·ч/т, при прессовании соответственно – 12-20 и 30-50 кВт·ч/т.

Определяющим фактором функционирования комплекса "нагрев-ОМД" является температура обрабатываемого металла на соответствующих стадиях технологического процесса. Отсюда вытекает возможность представления этого комплекса в виде ступенчатой системы, состоящей из трех объектов управления с последовательными во времени режимами их работы, где модель каждого из объектов представляется соответствующим уравнением нестационарной теплопроводности. В общем случае это уравнение Фурье-Кирхгофа, отражающее на первой стадии нагрев металла в индукторе, на второй - его охлаждение при транспортировании к деформирующему оборудованию, и на третьей – температурное поле в процессе ОМД.

Выбор задания на температуру нагрева металла в индукторе во многом определяет эффективность работы комплекса. Качество ОМД в значительной мере зависит от радиальной и осевой равномерности нагрева исходного материала. При индукционном нагреве более нагретой является поверхность заготовки, тогда как при обработке алюминиевых сплавов по техническим причинам желательнее обратное: более нагретый центр, чем поверхность. Это связано, с особенностями конструкции зоны обработки давлением (очага деформации), которые отражаются в тепловом балансе деформируемого металла. Так, например, прессование характеризуется большими частными деформациями и длительным скольжением металла по контактной поверхности инструмента. Отвод тепла в процессе прессования через контейнер и матрицу с увеличением скорости прессования уменьшается. Поэтому высокие скорости перемещения металла в пластической зоне могут вызвать значительное повышение температуры и довести её до интервала с пониженной вязкостью, т.е. к нарушению целостности прессуемого металла. При прессовании твёрдых алюминиевых сплавов температура металла в очаге деформации может повысится на 200 и более градусов.

Перепад по сечению заготовки в значительной степени определяется длиной индуктора: чем больше заготовок одновременно находится в индукторе, тем меньше удельная мощность в каждой из них и тем равномернее нагрев в поперечном сечении. Так, при нагреве алюминиевых заготовок диаметром 0,3 м, длиной 0,8 м до температуры 500⁰ С с производительностью 3 т/час, при изменении длины индуктора с 2,4 м до 4,0 м относительный радиальный перепад температуры изменяется с 13,5 % до 8,5 %.

Более эффективным способом выравнивания температуры, если позволяют энергетические возможности установки, является начальное превышение мощности необходимой по теплосодержанию и её дальнейшее изменение по определённому оптимальному закону

А.И. ДАНИЛУШКИН, д.т.н. профессор,
Д.Н. ПИМЕНОВ, аспирант,
А.Ю. ТАЙМОЛКИН, аспирант
(СамГТУ), г. Самара

Трехфазная индукционная система для технологического нагрева

Одним из основных направлений Федеральной целевой программы «Энергосбережение России» является повышение энергоэффективности энергоемких производств, где в результате мероприятий, предусмотренных программой, должна повыситься конкурентоспособность производимой продукции. К таким производствам относятся энергоемкие индукционные установки для нагрева крупногабаритных заготовок перед прессованием, подогрева жидкостей при транспортировке по трубопроводам и др. Конструктивно такие установки представляют собой многосекционные соленоиды, питающиеся от трехфазной сети промышленной частоты. Эксплуатация таких мощных потребителей сопровождается ухудшением качества электроэнергии, в частности, несимметричной нагрузкой фаз, что приводит к снижению коэффициента использования источника питания, увеличению потерь электроэнергии, неравномерному температурному распределению по длине нагреваемого изделия. В совокупности эти факторы приводят к увеличению себестоимости производства.

Одним из возможных путей совершенствования имеющихся конструкций установок индукционного нагрева промышленной частоты является предлагаемая авторами конструкция трехфазного индуктора с замкнутым цилиндрическим магнитопроводом, в продольных пазах которого расположена трехфазная катушка, выполненная из водоохлаждаемой медной трубки. Находящаяся внутри индуктора цилиндрическая загрузка (сплошной цилиндр или труба) при условии геометрической симметрии системы является симметричной нагрузкой. Сопrotивления фаз индуктора также симметричны, так как все три фазы имеют одинаковые параметры и охвачены общей магнитной системой. Эти обстоятельства обеспечивают абсолютно симметричную нагрузку фаз сети, что в принципе исключает необходимость симметрирующего устройства.

Устройства индукционного нагрева являются сложными техническими объектами, в которых протекают физические процессы различной природы. В общем случае математическое описание таких объектов представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. Аналитическое описание электромагнитных и тепловых процессов в рассматриваемой системе ввиду

сложной геометрии требует дополнительно разбиения модели на участки и рассмотрения процессов уже в них с последующим «сшиванием» результатов на границе, что вводит в расчеты дополнительную погрешность, а также лишает возможности представления о целостности системы и протекающих в ней процессов, и в то же время не дает точного решения. При расчете электромагнитного поля в отдельной зоне индукционного нагревателя с учетом вихревых токов, протекающих по проводникам обмоток или массивным участкам индукторов, обычно преследуют цель определения дополнительных потерь, вызываемых этими токами, и снижения индуктивных сопротивлений вследствие размагничивающего действия реакции вихревых токов, т. е. определения главным образом интегральных характеристик. С другой стороны, представляет интерес и изменение структуры поля вблизи границ и массивных элементов, а также распределение вихревых токов и вызванных ими потерь, так как термическая стойкость обмоток и других активных элементов установки определяется не средними, а местными максимальными потерями.

Сложная конфигурация электромагнитной системы, нелинейная зависимость электрофизических характеристик нагреваемого материала от температуры, нелинейный характер распределения внутренних источников тепла по радиусу цилиндра, а также наличие нескольких видов теплообмена на границах объекта не позволяют использовать аналитические методы расчета, поэтому в данной ситуации используется метод конечных элементов, как наиболее приспособленный для решения задач в нелинейной постановке

Для расчета конструктивных и режимных параметров индукционной системы разработана программа расчета теплового и электромагнитного полей на базе метода конечных элементов.

В целях изучения основных закономерностей процесса в базовой модели объекта принимается ряд допущений, не искажающих физической сущности явления, но позволяющих получить решение с допустимой погрешностью: ввиду малой инерционности электромагнитных процессов по сравнению с тепловыми можно при изучении нестационарных тепловых процессов пренебречь влиянием переходных режимов электромагнитного поля; в типовых ситуациях, характеризующихся большой величиной отношения длины нагревателя к диаметру нагреваемого цилиндра, влиянием краевых эффектов можно пренебречь. С учетом принятых допущений возможно раздельное решение электромагнитной и тепловой задач.

В связи с необходимостью учитывать неравномерность распределения температурного поля по длине температурное поле описывается двумерным уравнением теплопроводности.

Основными научными результатами исследования предлагаемого нового типа индукционной системы для технологического нагрева крупногабаритных заготовок перед прессованием являются методики рас-

чета электромагнитных и тепловых полей в системе «трехфазный индукционный нагреватель – цилиндрическая заготовка»; практически – конструкция индукционного нагревателя с улучшенными энерготехнологическими характеристиками, апробированная на экспериментальной установке.

В процессе исследования разработаны и уточнены методики расчета полей, в частности, определена методика проведения вычислительных экспериментов по расчету электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве ферромагнитной заготовки с более точной аппроксимацией зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в процессе нагрева. Значительную роль также играет и подготовительный этап, на котором определяются основные конструктивные и технологические параметры.

Численный расчет производился с помощью интегрированной диалоговой системы программ ELCUT 5.7 Professional. Анализ результатов проводится по интегральным и локальным величинам.

Основным результатом расчета электромагнитной задачи для системы индукционного нагрева являются распределение магнитной индукции в элементах системы, напряженности поля, картины плотности тока, плотности мощности. Полученные результаты распределения объемной мощности тепловыделения используются далее для расчета температурных распределений в элементах индукционной системы.

Тепловая задача в процессе исследования формулируется как задача расчета температурного поля, обусловленного электромагнитными источниками тепла в заготовке. Геометрическая модель заготовки соответствует геометрии электромагнитной задачи. Разбиение на блоки производилось таким образом, чтобы была обеспечена полная аналогия моделей обеих задач для передачи данных из электромагнитной задачи в тепловую. При построении сетки конечных элементов задавался автоматический шаг дискретизации.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Температурное распределение по радиусу заготовки при нагреве в поперечном поле трехфазного индуктора имеет такой же осесимметричный характер, что и при нагреве в соленоидальном индукторе. Неравномерность температурного распределения по окружности заготовки, обусловленная неравномерным распределением внутренних источников тепла под пазом и зубцом магнитопровода, незначительна и наблюдается только на расстоянии от поверхности, соответствующем глубине проникновения тока в металл. С приближением к центру заготовки изотермы принимают вид концентрических окружностей с центром, совпадающим с осью симметрии заготовки. Температурное поле футеровки имеет незначительную неравномерность между областями под трубкой и под зубцом магнитопровода. Дальнейшие исследования предполагают создание методики расчета и алгоритмов функционирования индукционной системы в оптимальном режиме.

Моделирование электротепловых процессов двухчастотного индукционного нагревателя

В работе рассматривается постановка и решение задачи моделирования электротепловых процессов сквозного нагрева крупногабаритных цилиндрических ферромагнитных заготовок перед пластической деформацией в двухчастотной индукционной нагревательной установке непрерывно–дискретного действия. При использовании двухчастотного индукционного нагревателя, состоящего из двух последовательно расположенных секций, первая секция рассчитывается на работу от источника питания промышленной частоты, при этом первая секция выполняется нерегулируемой, а заданное температурное распределение на выходе из индуктора обеспечивается регулированием электрического режима второй секции нагревателя. Расчет параметров предлагаемой конструкции индукционной нагревательной установки требует последовательного решения ряда задач, связанных с исследованием электромагнитных и тепловых полей в условиях существенных нелинейностей, обусловленных зависимостью электрофизических характеристик металла от температуры. Для решения поставленных задач необходимо создание математических моделей, адекватно отражающих реальные физические процессы в сложной нелинейной пространственно распределенной системе, а так же выполнение большого объема численных экспериментов.

Особенностью расчёта параметров двухчастотного индукционного нагревателя является сложный характер взаимосвязанных электромагнитных и теплофизических процессов, ярко выраженная неравномерность пространственного распределения внутренних источников тепла, индуцируемых электромагнитным полем индуктора, зависимость мощности внутреннего тепловыделения от температуры нагреваемых заготовок. Разработка систем моделирования электротепловых процессов индукционного нагрева движущихся ферромагнитных заготовок осложняется неравномерностью распределения удельной мощности по длине индуктора. Это объясняется тем, что при нагреве ферромагнитного материала выше точки Кюри происходит резкое изменение его магнитной проницаемости. Распределенность параметров объекта не позволяет использовать стандартные методики для систем с сосредоточенными параметрами. При индукционном нагреве ферромагнитных заготовок внутренние источники тепла зависят от температуры и эта зависимость существенно нелинейна. Достаточно точно эти зависимости могут быть получены только численными методами.

В связи с этим для разработки методики расчета двухчастотной индукционной системы, оптимизации конструктивных и режимных параметров в работе рассматривается численная математическая модель, описывающая процесс с учетом специфических особенностей двухчастотного нагрева, влияния на параметры нагревателя нелинейной зависимости магнитной проницаемости, удельного сопротивления, удельной теплоемкости от температуры в процессе нагрева, взаимного влияния тепловых полей смежных заготовок. В работе [1] приведена методика расчета электромагнитных и тепловых полей двухчастотного индукционного нагревателя, в которой учитывается неравномерность распределения источников тепла по длине заготовок. Однако, указанная методика не учитывает изменение магнитной проницаемости на каждой позиции, что приводит к погрешности при расчете величины выделяемой в каждой заготовке мощности. В настоящей работе для исследования электромагнитных и тепловых полей разработана более точная математическая модель процесса индукционного нагрева ферромагнитных изделий, учитывающая изменение магнитной проницаемости заготовок на каждой позиции, и её влияние на удельную мощность в каждой заготовке. Численный расчет электромагнитных полей в системе «индуктор–металл», содержащей ферромагнитную загрузку, производится с помощью программного комплекса ELCUT 5.7 Professional. Численным методом рассчитывается температурное поле заготовки, напряженность магнитного поля, удельная объемная мощность, плотность тока с помощью пакета программ FEMLAB.

Исходными данными для расчета являются:

- конструктивные параметры нагревателя – длина катушки нагревателя, диаметр индуктирующей катушки, число витков индуктора, толщина тепловой изоляции, размеры сечения трубки индуктора;
- энергетические параметры – напряжение питания, частота тока;
- параметры нагреваемых заготовок – внутренний и внешний радиусы заготовки, материал заготовки, длина, темп продвижения через нагреватель, массив табличных значений зависимостей удельного сопротивления от температуры, теплоемкости, плотности, коэффициента теплопроводности; табличные значения зависимостей относительной магнитной проницаемости загрузки от напряженности магнитного поля, коэффициент черноты поверхности;
- условия нагрева – начальная температура, базовая и заданная конечная температуры, температура охлаждающей жидкости, уровень тепловых потерь.

В электрическом блоке программного комплекса ELCUT 5.7 Professional определяются интегральные параметры индуктора с загрузкой. Расчет производится с использованием магнитной схемы замещения системы «индуктор–металл» по методу общего потока. Неоднородный характер загрузки по осевой координате учитывается включением в магнитную схему замещения сопротивления загрузки в виде

последовательной цепочки магнитных сопротивлений участков с кусочно-однородными свойствами.

В результате расчета определяются сопротивления загрузки и индуктора, токи и напряженность магнитного поля на каждом участке постоянства. Далее рассчитываются функции распределения источников тепла, напряженность поля и плотность токов в загрузке.

Полученные результаты используются для расчета интегральных параметров индукционной системы. Мощность второй секции индуктора рассчитывается из условия достижения требуемой температуры поверхности заготовки с допустимым перепадом температуры по сечению. По результатам тепловых расчетов уточняются теплофизические параметры, тепловые потери и координаты границ режимов в исходных данных. Вновь производится электромагнитный, а затем тепловой расчет.

В работе в целях упрощения расчетов и в связи с тем, что на дальнейших стадиях нагрева практически отсутствуют источники нелинейности объекта, производилась аппроксимация температурного распределения по сечению заготовки, выходящей из первой секции. Удовлетворительная аппроксимация для температурного распределения заготовки на выходе из первой секции выполнена по методу наименьших квадратов.

Особенностью моделирования взаимосвязанных электромагнитной и тепловой задач является необходимость учитывать зависимость распределения внутренних источников тепла от температуры. Решение тепловой задачи для заготовок, находящихся в нагревателе, проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения в электромагнитной задаче и задании полученной картины в качестве источников для тепловой задачи. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения.

Результаты работы положены в основу методики расчета параметров двухчастотного индукционного нагревателя ферромагнитных заготовок под пластическую деформацию. Применение разработанной на основе численной математической модели методики расчета электромагнитных и тепловых характеристик процесса нагрева позволит с более высокой точностью рассчитать интегральные параметры двухчастотного индукционного нагревателя.

Литература

1. А.И. Данилушкин, А.В. Кожемякин, С.В. Князев. Моделирование электро-тепловых полей в двухчастотном индукционном нагревателе. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ. Труды седьмой Всероссийской научной конф. с международным участием. СамГТУ, Самара, 2010, Ч.2, с.75–77.

Моделирование индукционного нагрева плоским индуктором в программе COMSOL MULTIPHYSICS

Индукционный нагрев проводящих тел является одним из наиболее широко используемых технологических процессов. Типичными примерами промышленного применения индукционного нагрева являются термическая обработка металлов, сквозной нагрев под пластическую деформацию, сварка, наплавка и пайка металлов [1]. Основными преимуществами индукционного нагрева являются отсутствие непосредственной гальванической связи с изделием, высокая скорость нагрева, практически неограниченный диапазон достижения температур, возможность регулирования пространственного расположения зоны нагрева. Последнее преимущество связано с тем, что вихревые токи, являющиеся причиной нагрева изделия, протекают только в пределах площади, охватываемой индуктором. Так при необходимости нагрева всей поверхности изделия используются цилиндрические индукторы, в которых нагреваемый металл помещается внутрь. Если же требуется обеспечить нагрев заданного участка плоской поверхности, применяется индуктор в виде плоской катушки индуктивности, осуществляющей электромагнитное воздействие на плоскость изделия.

Для изучения электромагнитных и тепловых процессов, связанных с индукционным нагревом, наиболее рационально использовать компьютерные программы, основанные на методе конечных элементов. В данной работе представлена модель индукционного нагрева цилиндрической заготовки плоским индуктором, выполненная в программе Comsol Multiphysics.

Геометрия разработанных двумерных осесимметричных моделей включает в себя одновитковый (рис. 1,а) или многовитковый (рис. 1,б) индуктор – 1, нагреваемое изделие – 2 и границу расчётной области – 3, задаваемую с одной стороны осевой линией симметрии, а с другой – линией окружности, находящейся на значительном расстоянии от источников поля.

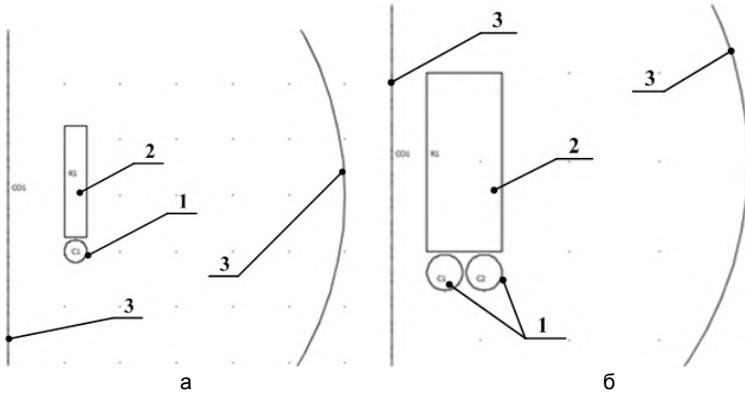


Рис. 1. Геометрия двухмерных моделей:
 а – одновитковый индуктор; б – многовитковый индуктор
 1 – индуктор; 2 – нагреваемое изделие; 3 – граница расчётной области

Совместный расчёт теплового и магнитного полей осуществляется на основе уравнений:

$$\alpha = \frac{I_{u2}(R_{u3} + R_1) - U_H}{U}, \quad j\omega\sigma A + \nabla \cdot (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \cdot A) = \frac{\sigma U_s}{2\pi r} e_\phi$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T = Q$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))}$$

Здесь U_B – напряжение, прикладываемое к виткам индуктора; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная); μ_r – относительная магнитная проницаемость; A – векторный магнитный потенциал; C_p – теплоёмкость; k – теплопроводность; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление металла при температуре $T_0 = 273$ К; α – температурный коэффициент сопротивления.

При моделировании многовиткового плоского индуктора (рис. 1, б) каждый его виток представляется отдельно и имеет свои геометрические размеры, и, как следствие, свои физические параметры. Поэтому задание в витках одинаковых значений напряжений, полученных путём деления приложенного к индуктору общего напряжения на количество витков, недопустимо. Для обеспечения одного и того же тока во всех витках плоского индуктора необходимо задать своё значение

напряжения, рассчитанное с учётом взаимного влияния витков друг на друга. При этом следует отметить, что понятия собственной индуктивности витка и взаимной индуктивности между витками нельзя использовать без учёта смещения вектора плотности тока в толще проводника индуктора, в противном случае как показано в [2], рассчитанные без учёта этого явления напряжения на отдельных витках не дадут один и тот же ток, а расчётные значения взаимных индуктивностей будут иметь комплексные значения, что противоречит физике процесса. Для точного определения напряжений на витках при условии поддержания одного и того же значения тока в каждом витке можно воспользоваться итерационным методом подбора витковых напряжений. Однако наилучшим образом подходит алгоритм расчёта, основанный на линейности электромагнитных взаимодействий, а значит и математических зависимостей, что позволяет реализовать совместное решение в виде полевых расчётов с расчётами методом пассивного многополюсника.

Картини распределения магнитного поля и плотности тока, рассчитанные для одновиткового плоского индуктора на частоте 10 кГц, представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Анализ результатов выявил существенную неравномерность нагрева по толщине изделия, что связано с влиянием кольцевого и поверхностного эффектов. К более равномерному нагреву приводит использование многовиткового индуктора.

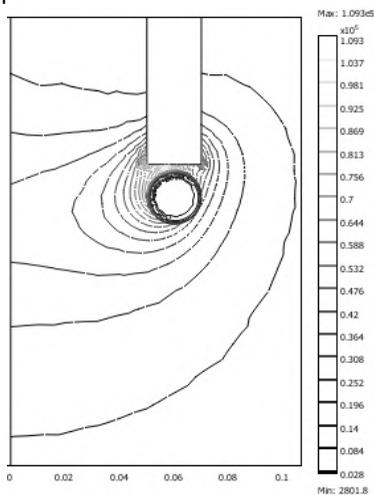


Рис. 4. Картина распределения магнитного поля в пространстве на частоте 10 кГц

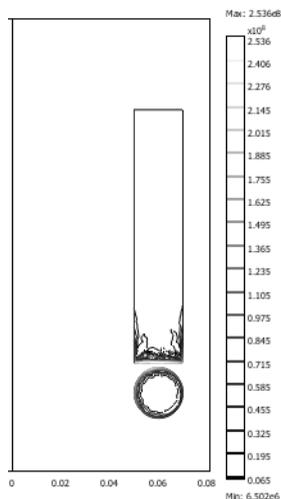


Рис. 5. Картина распределения плотности тока в пространстве на частоте 10 кГц

Представленный метод моделирования индукционного нагрева, осуществляющий параллельный расчёт электромагнитных и тепловых полей, может быть использован для оптимизации конструкции индукторов, применяемых для различных технологических процессов.

Литература

1. **Современные** энергосберегающие электротехнологии: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Блинов, А.С. Васильев, А.Н. Никаноров и др. – СПб: Изд-во СПбГТЭУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.: ил.
2. **Лебедев В.Д., Скобелева Е.С.** Моделирование и исследование свойств плоских индукторов с учётом поверхностного эффекта и эффекта близости. / Вестник научно-промышленного общества – М.: «Алев-В», 2007 г., выпуск 11. – с. 29-33.

УДК 621.365.5

Е.М. ГРИШИНА, к.т.н., доцент,
Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, д.т.н., профессор
(СГТУ имени Ю.А. Гагарина), г. Саратов

Влияние нормативных параметров на эффективность СВЧ электротермического оборудования

В условиях рыночной экономики говорить об эффективности электротермического оборудования следует с использованием таких экономических показателей, как интегральный эффект (чистый дисконтированный доход), индекс доходности, внутренняя норма прибыли, срок окупаемости [1]. Особое значение этих показателей имеет интегральный эффект, который, например, на интервале в один год при выпуске одного вида продукции можно записать в виде [1].

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma} = & \left\{ (C_{\Pi} - C_c) (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) - C_{\mathcal{E}} (1 - \gamma_n) - C_{зп} (1 - \gamma_n - \gamma_{зп}) - \right. \\ & \left. - C_{бр} (1 - \gamma_n) - K [1 + i_{кр} + \gamma_{им} + (\gamma_{зп} + \gamma_a)(1 - \gamma_n)] \right\} (1 - \gamma_y), \end{aligned} \quad (1)$$

где Π , C – годовой объем производства и цена единицы продукции; C_c , $C_{\mathcal{E}}$, $C_{зп}$, $C_{бр}$ – затраты на сырье, электроэнергию и воду, заработную плату обслуживающего персонала и брак; K – капиталовложения; γ_n , $\gamma_{ндс}$, $\gamma_{им}$, $\gamma_{зп}$, γ_a , γ_y – коэффициенты, учитывающие налоги на прибыль, добавочную стоимость, имущество, начисления на зарплату, отчисления на амортизацию, запасные части, выплату дивидендов; $i_{кр}$ – банковский кредит.

Величины Π , C_c , $C_{\mathcal{E}}$, $C_{зп}$, $C_{бр}$, K зависят от структуры, параметров электротермического оборудования, параметров технологического

процесса, цен и сырье оборудование. В общей сложности для СВЧ электротермического оборудования зависит до трех десятков параметров в зависимости от типа оборудования [3]. Эти параметры можно поделить в зависимости от решаемой задачи на зависимые и нормативные.

Независимые параметры оптимизируются при технико-экономических расчетах при проектировании оборудования по $\dot{Y}_{\Sigma \max}$ [4]. К ним относятся число установок N , число СВЧ генераторов в одной установке M , мощность P и частота f СВЧ генератора. Большинство же параметров являются нормативными, то есть являются заданными. К ним относятся, например, $\gamma_n, \gamma_{ндс}, \gamma_{им}, \gamma_{зп}, \gamma_a, \gamma_y, i_{кр}$, цены на сырье и оборудование, параметры обрабатываемого объекта и другие.

Рассмотрим влияние нормативных параметров на величину \mathcal{E}_{Σ} .

Величина \mathcal{E}_{Σ} тем больше, чем меньше все виды затрат, налоги, отчисления, банковский процент и дивиденды. Это значит, что \mathcal{E}_{Σ} больше, если меньше тарифы на энергоресурсы, число рабочих дней в году, время работы оборудования по выпуску готовой продукции, число остановок установки, работающих в методическом режиме и чем больше КПД СВЧ генератора, рабочей камеры по использованию СВЧ энергии, срок службы СВЧ генератора.

Разумеется, величина \mathcal{E}_{Σ} зависит от того, проводится ли мероприятия энергосбережению.

Особенно сильно зависит \mathcal{E}_{Σ} от цены на сырье и СВЧ электротермического оборудования. В [4] рассмотрена проблема гармонизации интересов производителей и покупателей СВЧ электротермического оборудования.

Что касается диэлектрических параметров ϵ' и $\operatorname{tg}\sigma$ обрабатываемого объекта, то от них в конечном счете зависят оптимальные значения переменных параметров, а следовательно, тип рабочей камеры, габариты обрабатываемого объекта [5]. В свою очередь теплофизические параметры c_d, ρ_d определяют время термообработки (нагрева, сушки, плавления, пастеризации, стерилизации, дефростации), от них зависит темп термообработки, что определяет величину P СВЧ генератора. Другими словами, $\epsilon', \operatorname{tg}\sigma, c_d, \rho_d$ влияют и на цены оборудования, то есть в (1) на K .

Наконец на \mathcal{E}_Σ влияют потребительские свойства обрабатываемого объекта: \mathcal{E}_Σ тем больше, чем выше цена продукции Ц СВЧ электротермического оборудования.

Важно подчеркнуть, что соотношение (1) связывает социально значимые параметры, такие как \mathcal{E}_Σ и $C_{зп}$, $\gamma_{зп}$, γ_y , $\gamma_{ндс}$, тарифы на электроэнергию. Так, например, соотношения (2) и (3) определяют максимальный тариф на электроэнергию и максимальную стоимость установки, при которых можно в течение первого года эксплуатации СВЧ электротермического оборудования вернуть банку кредит, выплатить налоги, дивиденды, заработанную плату работникам.

$$T_{\mathcal{E}_{\max}} = \frac{(\text{ПЦ}-C_c)(1-\gamma_n-\gamma_{ндс})}{Q_{\mathcal{E}}(1-\gamma_n)} - \frac{C_{зп}(1-\gamma_n-\gamma_{зп})}{Q_{\mathcal{E}}(1-\gamma_n)} - \frac{C_{бр}}{Q_{\mathcal{E}}} \cdot K \left[\frac{1+i_{кр}+\gamma_{им}}{Q_{\mathcal{E}}(1-\gamma_n)} + \frac{\gamma_n-\gamma_{зп}}{Q_{\mathcal{E}}} \right], \quad (2)$$

$$K_{\max} = \frac{(\text{ПЦ}-C_c)(1-\gamma_n-\gamma_{ндс})-C_{\mathcal{E}}(1-\gamma_n)}{1+i_{кр}+\gamma_{им}+(\gamma_{зп}+\gamma_a)(1-\gamma_n)} - \frac{C_{зп}(1-\gamma_n-\gamma_{зп})-C_{бр}(1-\gamma_n)}{1+i_{кр}+\gamma_{им}+(\gamma_{зп}+\gamma_a)(1-\gamma_n)}, \quad (3)$$

где $Q_{\mathcal{E}}$ - расход в год электроэнергии; $T_{\mathcal{E}}$ - тариф на электроэнергию.

Соотношения (2) и (3) дают возможность говорить о нормативных параметрах в социальном аспекте. Так, максимально допустимые тариф $T_{\mathcal{E}_{\max}}$ и цена СВЧ электротермического оборудования будут тем

меньше, чем меньше γ_n , $\gamma_{ндс}$, $\gamma_{им}$, $\gamma_{зп}$, $i_{кр}$, и тем больше, чем больше П, Ц.

Отметим, что остается открытым вопрос о социальном допустимом повышении цены продукции Ц. Что же касается K, то при $K > K_{\max}$ не выгодны инвестиции в электротермию.

Литература

1. **Методические** рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. – Официальное издание. – М.: Госстрой России, Мин экономики РФ, Мин финансов РФ, Госкомпром России, 1994, 31 марта. - №7. – 12/47.
2. **Архангельский Ю.С.** Техничко-экономические и социальные аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вестник Саратов. гос. техн.ун-та, 2010.- №3(47).-С.103-106.
3. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. – Саратов: Саратов. гос. Техн. ун-т, 2000. – 148с.
4. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский . – Саратов: Саратов. гос. Техн. ун-т, 2003. – 212с.

Л.С. ЗИМИН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой,
А.С. ЕГИАЗАРЯН, аспирант
(СамГТУ) г. Самара

Электроснабжение электротермического производства

В настоящее время наиболее прогрессивным видом электронагрева является индукционный нагрев. В таком случае действительно оптимальный технологический комплекс «индукционная нагревательная установка (ИНУ) - деформация» можно спроектировать только с учётом его системы электроснабжения (СЭС). Под оптимальным проектированием СЭС комплекса ИНУ понимается построение наиболее экономичного её варианта при соблюдении технических условий, накладываемых как элементами СЭС, так и потребителями – ИНУ. В качестве экономического критерия оптимизации целесообразно принимать суммарные приведенные затраты на СЭС, которые определяются технологическими, электротехническими и топологическими параметрами. К технологическим относятся: технологическая схема процесса «ИНУ – деформация» с указанием режимов работы, количество и мощность ИНУ, частота тока, требования к надёжности электроснабжения и регулированию мощности; к электротехническим: напряжение и число фаз (при частоте 50 Гц) ИНУ, количество и мощность источников питания, компенсирующих устройств, конструктивное исполнение сети; к топологическим: координаты расположения ИНУ, источников питания, компенсирующих устройств, а также конфигурация сети.

Упрощенная постановка подобных задач при индукционном нагреве рассматривается при оптимизации точки подключения к магистрали (общим шинам) высокочастотных генераторов. При этом имеется в виду одномерная топология и технический критерий оптимизации. Но наибольший интерес с экономической точки зрения представляет оптимизация мощных нагревательных комплексов прокатных и прессовых производств для обработки крупногабаритных заготовок, когда ИНУ выполняют на частоту 50 Гц.

Согласно ПУЭ, ИНУ отнесены к специальным электроустановкам, которые могут иметь отличные от общепромышленных ряды электротехнических параметров – шкалы напряжений, мощностей электропечных трансформаторов.

В настоящее время существует тенденция к укрупнению электротермического оборудования, под которым понимается увеличение емкости, размеров рабочего пространства или мощности единицы оборудования. При этом обычно происходит комплексное улучшение большей части эксплуатационных и производственных показателей.

Правда, при укрупнении оборудования приходится встречаться с рядом трудностей. Во-первых, с организационными и экономическими трудностями, которые вызваны необходимостью рационального использования крупных агрегатов, для чего следует сосредоточить в одном месте производство большого количества однородной продукции, так как частые переналадки или неполная загрузка оборудования значительно уменьшает его эффективность. Кроме того, строительство крупных электротермических производств связано с большими одновременными капитальными вложениями и требует значительных затрат времени. Во-вторых, это трудности, связанные с эксплуатацией крупных агрегатов, - необходимость в обслуживающем персонале более высокой квалификации, лучшей организации технологического процесса и более совершенных средствах контроля. И, наконец, основными являются трудности, связанные с решением сложных технических задач, которые усугубляются тем, что по мере укрупнения оборудования возрастают требования, предъявляемые к его надежности, что в значительной степени определяется надёжностью СЭС.

При увеличении единичных мощностей до 10 МВт и выше становится целесообразным не только переход на промышленную частоту тока, но и на стандартные ряды напряжений, существующие для общепромышленных установок высокого напряжения (6, 10 кВ). Таким образом, напряжение питания ИСУ можно исключить из числа параметров оптимизации.

С ростом мощности ИСУ при их однофазном исполнении возникает проблема электромагнитной совместимости ИСУ с обычными потребителями, т.к. симметрирование группы ИСУ согласованием их одновременной работы затруднительно, а применение симметрирующих устройств становится неэкономичным. Поэтому целесообразным представляется два альтернативных решения: раздельное питание ИСУ и других потребителей или применение ИСУ в трёхфазном исполнении. Следовательно параметр числа фаз, имеющий одно из двух значений, целесообразно определять путём, независимым от задачи оптимизации.

Таким образом, к числу оптимизируемых электротехнических параметров следует отнести: количество и мощность источников питания, в данном случае трансформаторных подстанций, конструкцию сети (сечение токопровода) и мощность конденсаторной установки.

При фиксированном расположении технологического оборудования, а соответственно ИСУ и конденсаторных установок, оптимизируемыми топологическими параметрами будут лишь координаты расположения источников питания – трансформаторных подстанций. Поскольку расположение подстанций в цехе приходится выбирать в условиях территориальных ограничений, то целесообразно их координаты искать не на непрерывном множестве значений, а на дискретном, без ограничений. При радиальной схеме питания ИСУ длина линий может опре-

деляться приближенно для одной из двух конфигураций трассы сети, выполненной: или по кратчайшему расстоянию между подстанцией и ИНУ, или с участками, параллельными координатным осям здания цеха.

Изложенные выше соображения позволяют поставить задачу структурной оптимизации СЭС ИНУ, при которой находится количество подстанций, координаты их расположения, параметры подстанций, сети и конденсаторных установок, соответствующие минимуму приведенных затрат на СЭС, при учёте технических ограничений. К последним относятся номенклатурные ограничения по числу отходящих от подстанции линий, допустимой нагрузке подстанций, проводников сети, потере напряжения в линиях.

Надёжность электроснабжения непосредственно не оценивается критериальной функцией, однако может быть учтена при формировании заданной номенклатуры подстанций. Например, при отнесении ИНУ к потребителям первой категории (обязательно наличие АВР) массив понизительных подстанций должен содержать набор только двухтрансформаторных подстанций с трансформаторами различной мощности. При отсутствии потребителей первой категории исходный массив должен содержать данные лишь по однотрансформаторным подстанциям. При наличии однофазных ИНУ несимметрия токов нагрузок, показатели которой также не учтены в модели (2)-(11), уменьшается путем упорядочения их подключений к подстанциям по следующему алгоритму: каждый последующий из отобранных по уменьшению мощности группы потребителей должен подключаться к наименее загруженной на данный момент фазе.

Другие показатели качества электроэнергии (колебания и несинусоидальность напряжения сети), вследствие характеристик ИНУ как потребителей электроэнергии, не оказывают влияние на структуру и параметры сети, поэтому в модели оптимизации не учитываются. Имея в виду консервативность оптимальных параметров в точке оптимума при широком варьировании исходных экономических и технических показателей, целесообразно предусмотреть ряд дополнительных технико-экономических показателей, характеризующих каждый вариант структуры СЭС, например, вес проводникового материала, суммарную длину распределительной сети, стоимость потерь электроэнергии в сети, количество резервных защитных аппаратов на подстанциях и т.п. Такая оптимизационная задача относится к классу задач целочисленного нелинейного программирования, универсальные методы решения которых до настоящего времени не разработаны. Точное решение задачи может дать лишь полный перебор экспоненциального числа вариантов, что практически неразрешимо.

Поэтому для решения поставленной технико-экономической задачи предлагается использовать стратегию релаксации, что позволяет свести ее к итеративной последовательности решения задач целочис-

ленного линейного программирования. Следует отметить, что эффект оптимизации структуры СЭС по сравнению с методами традиционного проектирования, повышается с увеличением размерности, расширением номенклатуры подстанций, разбросанностью месторасположения ИНУ.

УДК 621.791.75

Р.И. КАНАФЕЕВ, студент, М.С. ЖЕБАЕВ, студент;
А.В. ТАНАЕВ, студент,
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 полным током 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 резко усиливается. Этим эффектом пользуются при изготовлении электродов для работы на переменном токе, но процесс повторного возбуждения неразрывно связан с динамическими свойствами источника питания. [1]

Чем выше скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке, тем более надёжен процесс повторного возбуждения. Наиболее просто это решается повышением напряжения холостого хода источника, но оно ограничено ГОСТом. Поэтому с целью повышения надёжного зажигания желательнее снизить напряжение холостого хода при обеспечении надёжности зажигания, что возможно путём воздействия на динамические параметры источника питания.

Как отмечается в [1,2] повышение устойчивости можно достичь применением генераторов импульсов. Однако такие устройства требуют наличие ёмкостного накопителя энергии, мощного коммутирующего устройства 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 зажигания повысить мгновенные значения напряжения, за счёт чего обеспечить надёжный пробой дугового промежутка.

Для анализа процесса устойчивости необходимо совместное решение нелинейной системы уравнений, описывающей 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 определить индикаторным методом, предложенным Хамерлундом. 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 $P_{om} = const$, что соответствует падающей статической характеристике реальной сварочной дуги.

По предложению Майра можно считать сопротивление дугового столба при отсутствии подводимой извне 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_{∂} и I_2 и, используя уравнение (2), получим

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

Учитывая, что $U_{\partial} = I_2 R_0$, найдем производную от $g = \frac{1}{R}$:

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

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

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

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:

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

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 при использовании схемы замещения сварочного трансформатора второго порядка и модели сварочной дуги, предложенной Майером.

Компьютерный анализ процесса повторного возбуждения дуги подтверждает целесообразность учёта динамической индуктивности источника питания и применения нелинейных индуктивностей в сварочных цепях.

Литература

1. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966, 367с.
2. Лесков Г.Н. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970, 335с.
3. Мякишев В.М. Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода. – Самара, СамГТУ, 2010, 170 с.

Постоянная времени дуги как один из факторов динамического состояния

Сварочные источники переменного тока характеризуются высокой надежностью и стабильностью режима работы. Однако переменный ток $2f$ раз прерывается, дуга гаснет и в дальнейшем снова возбуждается. Процесс этот очень динамичный и надежность повторного возбуждения зависит от ряда случайных факторов и возможных малых возмущений Δx_i . Как отмечается в литературе [1,2].

Для оценки устойчивости любого из состояний динамического режима дугового промежутка с током I_0 напряжением U_0 пользуются общим методом анализа устойчивости любого движения, предложенным А.М.Ляпуновым. При этом любую переменную x_i , в произвольный момент времени $t=0$, заменяют суммой ее значения x_{i0} в данный момент и возможным малым возмущением Δx_i , т.е. $x_i = x_{i0} + \Delta x_i$. Если при этом возмущение Δx_i остается малым или стремится к нулю, то рассматриваемое динамическое состояние является устойчивым.

Предположим, в некоторый момент $t=0$ через дуговой промежуток протекает малый ток I_0 при напряжении U_3 , что соответствует моменту перехода тока через нуль. Если отклонение тока с течением времени возрастает, то это означает, что состояние промежутка характеризуется неустойчивостью достигнутого режима U_3 и I_0 и дальнейшие его изменения приведут к убыванию тока и прекращению разряда. Дуга в таком промежутке повторно возбудиться не может.

Для описания динамического состояния промежутка в первом приближении мощность потерь его P_p принята постоянной $P_0 = I_0 U_{30}$, соответствующей потерям в исходном состоянии при токе I_0 , напряжении U_{30} . Как изложено в работе А.М.Залесского[1] при повторном зажигании дуги её математическая модель описывается Майром и из энергетического анализа можно получить:

$$Q_0 \left(\frac{1}{I_0} \frac{di}{dt} - \frac{1}{U_{30}} \frac{du}{dt} \right) = I_0 + U_{30} i$$

Деление и умножение левой части на $P_0 = U_{30} I_0$ дает:

$$\theta \left(U_{30} \frac{di}{dt} - I_0 \frac{du}{dt} \right) = I_0 u + U_{30} i$$

Здесь величина $\theta = \frac{Q_0}{P_0}$ представляет собой время и называется

постоянной времени дуги.

Применив к процессу в электрической цепи, содержащей в качестве одного элемента дуговой промежуток, составим характеристическое уравнение и решив его получим, что вещественные корни уравнения или вещественные части комплексных корней отрицательны, то процесс устойчив.

Оценим более детально факторы, определяющие постоянную времени θ створа сварочной дуги и ее ориентировочные значения. Как изложено в [2] в момент времени $t=0$, если её ствол имеет диаметр d , и ток дуги I , постоянную времени при атмосферном давлении можно определить из выражения:

$$\theta \cong 2 \cdot 10^4 \frac{I_e^{2/3} g_e^{1/3}}{U_i^{67/12} \alpha^{1/3}}$$

Это уравнение показывает, что постоянная времени открытой дуги определяется, прежде всего, потенциалом ионизации газа створа дуги U_i . Более удобно использовать выражение постоянной времени дуги в виде:

$$0 \leq 1,75 \cdot 10^{-2} \frac{I_e^{2/3}}{U_i^{67/12}};$$

Здесь U_i выражено в э-в.

Существуют различные способы теоретического и экспериментального определения постоянной времени дуги. Но все эти способы более удобные формы её определения связаны с громоздкими вычислениями или требуют проведения сложных испытаний. Однако достаточно просто постоянную времени дуги можно определить по гармоническому составу напряжения на дуге [3]:

$$\theta = \frac{1}{4\omega} \left(\frac{1}{\chi} - \chi \right),$$

где χ - есть отношение двух нечетных ближайших гармоник.

Для этого необходимо снять осциллограмму напряжения на дуге и по ней определить амплитуды первой и третьей гармоник. Амплитуды соответствующих гармоник можно экспериментально анализатором гармоник.

Ниже приведены результаты применения данного метода для определения постоянной времени сварочной дуги, горящей между пластиной из материала Ст-3 и электродом марки Тi ш 2,5мм при сварочном токе $I_d = 23A$ и напряжении на дуге $U_d = 22,5B$ (рис.3.8). Используя метод графического разложения несинусоидальной функции в ряд Фурье, получаем амплитуды первой и третьей гармоник:

$$A_1 = 3,26;$$

$$A_3 = 1,28.$$

Следовательно,

$$\chi = \frac{A_3}{A_1} = 0,393 ,$$

а постоянная времени для этого случая: $\theta = 1,7 \cdot 10^{-3}$ с.

Постоянную времени θ можно ориентировочно получить из осциллограммы напряжения на дуге, по промежутку времени t_0 между моментом перехода тока через нулевое значение и пиком напряжения зажигания [4].

Вместе с тем следует отметить, что подсчитанные значения θ по порядку величины отличаются от тех, которые можно ожидать на основании термической теории столба дуги. Объяснение этому явлению, по мнению авторов, следует искать в том, что при экспериментальных исследованиях дуг переменного тока приходится сталкиваться сразу со всем комплексом физических явлений, имеющих место в дуге. В частности, тепловая инерционность дуги складывается не только из тепловой инерционности ствола, но и из инерционности приэлектродных областей, которая определяется тепловым режимом электродов и другими физическими факторами. Величину θ , следовательно, надо понимать в этом случае как эквивалентную количественную меру инерционности дуги в целом.

Литература

1. **Залесский А.М.** Электрическая дуга отключения. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. **Лесков Г.Н.** Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970, 335с.
3. **Мякишев В.М.** Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода. – Самара, СамГТУ, 2010, 170 с.
4. **Таев И.С.** Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. М.-Л., Энергия, 1965.

УДК 621.791

К.В. КУЛИКОВ, к.т.н., доцент (ИГЭУ) г. Иваново

Применение средств LTspice IV для расчета инверторных источников питания

Современные электротехнологические установки требуют все больших мощностей. Для минимизации массогабаритных показателей используют, в основном, инверторные структуры преобразователей. Силовая часть источников питания выполняется в виде одноктных или двухтактных инверторных схем с частотой преобразования около 100 кГц. Однако токовая нагрузка современных ключей часто бывает

недостаточна для передачи нужной мощности. В этом случае применяют параллельные схемы включения инверторов. В выходных цепях инверторов при таком включении могут возникать достаточно большие уравнивающие токи, требующие применения уравнивающих элементов, в частности уравнивающих реакторов. Для минимизации массогабаритных показателей этих элементов на этапе проектирования целесообразно использовать моделирование выходных цепей установки. Одним из достаточно мощных эмуляторов электронных схем является программа LTspice IV.

На рис. 1 представлена схема одной из структур с параллельным включением инверторов.

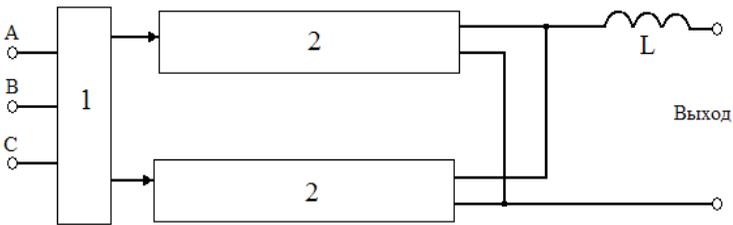


Рис.1. 1- силовой выпрямитель, 2- блоки инверторов

На рис. 2 показан результат моделирования выходного тока при пуске источника.

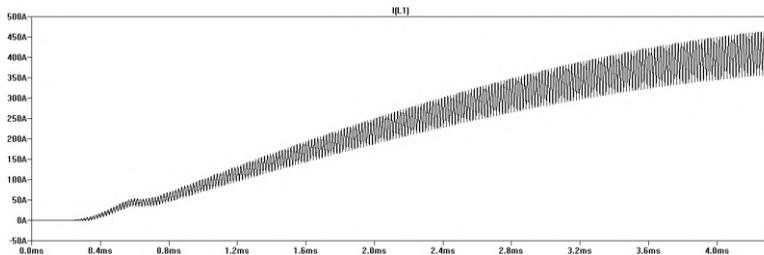


Рис.2.

Программный комплекс LTspice может быть применен как при выполнении проектных работ в области силовых источников питания, так и в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных работ.

Исследование возможности создания термоэлектрического генератора на основе фазового перехода

Ископаемые виды топлива истощаются с каждым днем, поэтому очень важно искать альтернативные методы решения проблемы увеличения спроса на электроэнергию (ЭЭ) в мире. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становятся все более важными в настоящее время. Существуют возобновляемые источники энергии мощностью от сотни МВт (мощные) и мощность не более сотни Вт (низкомощные). Возобновляемые источники также могут быть классифицированы в зависимости от того подключены они к сети или нет, а также известной как ТЭЦ и автономные системы. Автономные системы обычно являются низкомощными и используются в труднодоступных местах, где электричество недоступно. Для питания автономных систем обычно используют фотоэлектрических и ветровых систем как источники электроэнергии [1].

В связи с этим представляет интерес использование теплоты фазовых переходов для питания автономных систем. Это дает возможность использовать теплоты солнечной радиации не только днем, но и ночью. Методом калориметрии и ядерной магнитной резонансной релаксометрии нами исследованы кристаллогидраты – накопители тепла и потенциальные источники электроэнергии характеристики которых даны в табл.1. [2]

Таблица 1. **Характеристики кристаллогидратных солей**

Материал	$T_{пл}$, °C	$Q_{пл}$ (кДж/кг)	$\rho_{ТВ}$ кг/м ³
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29,7	170	1710
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32,4	251	1460
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48	210	1600
$CH_3COONa \cdot 3H_2O$	58,2	260	1450
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	116	165	1570

Разработанная нами экспериментальная установка для исследования процесс получения ЭЭ состоит из следующих элементов:

1. Фазаменяющего вещества (рабочее вещество) табл.1.
2. Термоэлемента (ТЕС-127-6) работающий на основе эффект Зеебека.
3. Измерительных приборов (вольтметры, амперметры и термометры).
4. Теплоаккумулирующего солнечного коллектора (конденсатор),

5. Рабочего вещества (вода для охлаждения холодной стороны ТЭ).
6. Нижней емкости охлаждения,
7. Тепло (холод) передающие пластины,
8. Контроллера (DC / DC преобразователь),
9. Аккумулятора,
10. Контактных спаев термоэлемента,

Принцип измерения:

Горячая сторона ТЭ нагревается прямым попаданием солнечных лучей, от лампы или нагревателя на фазоменяющее вещество ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), а холодная сторона охлаждается радиатором или водой через тепло (холод) передающие пластины. На выходе термоэлемента измеряется значение напряжение и ток подключением к контактным спаям термоэлемента к вольтметру и амперметру, а температура остывания фазоменяющего вещества ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) измеряется с помощью термометра или терморезистора.

Результаты показывают что, экзотермический эффект практически при комнатной температуре в $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ приводит к скачку напряжения на термоэлементе TEC-127-6 на величину в $\Delta U \approx 400$ мВ и $\Delta T = 12^\circ\text{C}$ что весьма существенно и может быть использовано для питания аккумулятора. Выделение тепла и соответственно снимаемого с ТЭ напряжения растянуто на длительный интервал по времени - 360 минут, что позволяет использовать аккумулятор длительное время рис. 1 и 2.

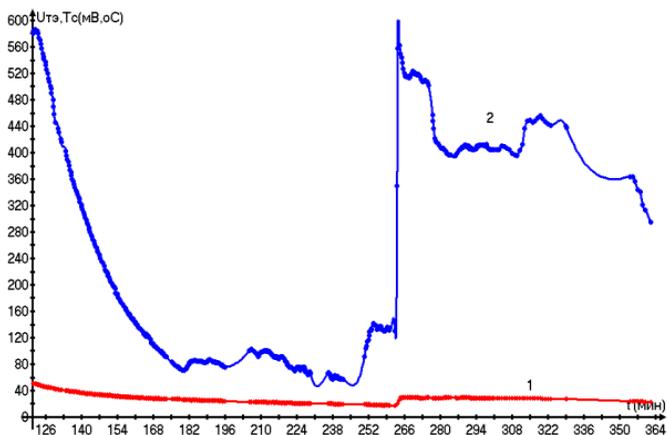


Рис. 1. Зависимости от времени t (мин) остывания $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ температуры T ($^\circ\text{C}$) (кривая 1) и термоэлектрического напряжения $U_{TЭ}$ (мВ) (кривая 2) на выводах термоэлемента TEC-127-6.

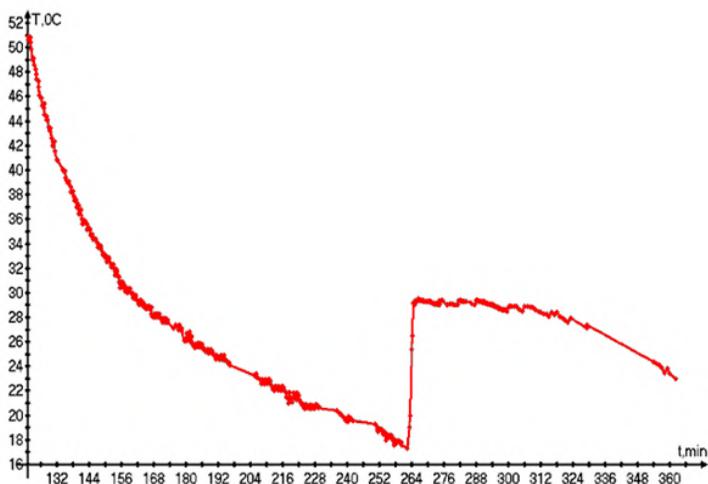


Рис. 2. Зависимость от времени t (мин) остывания соли $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ температуры T (°C).

Результаты исследования показывают, что на основе фазового перехода может быть разработано устройство, которое использует прямое преобразование тепла перепада температур в электроэнергию с помощью термоэлектрических преобразователей, основанных на эффекте Зеебека, для выработки электроэнергии в непрерывном режиме в системах электропитания автономных приборов и средств автоматики на трубопроводах, независимых устройствах подзарядки аккумуляторов, компьютеров, датчиков JPS-навигации, датчиков и экологических устройств электропитания.

Литература

1. **Nimrod Vazquez**, Claudia Hernandez and Esli Vazquez. A DC/DC Converter for Clean-Energy.Applications, Clean Energy Systems and Experiences10, 2010.
2. **Самойлович А. Г.** Термоэлектрические и термомагнитные методы преращения энергии: Конспект лекций. — М.: Издательство ЛКИ, 2007. — 224 с.

В.А. МАРТЫНОВ д.т.н., профессор,
 А.Н. ГОЛУБЕВ д.т.н., профессор,
 А.В. АЛЕЙНИКОВ студент,
 (ИГЭУ) г. Иваново

Магнитоэлектрический многофазный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками

Магнитоэлектрические двигатели получили широкое распространение в бесконтактных регулируемых электроприводах различных машин и механизмов. При этом для улучшения виброшумовых характеристик этих машин целесообразно использование многофазной ($m > 3$) обмотки статора. В настоящее время математическое моделирование m -фазных двигателей основано на допущениях о гладком зазоре машины и отсутствии насыщения магнитопровода, что не позволяет корректно оценить пульсации электромагнитного момента. В данной статье предлагается модель магнитоэлектрического многофазного двигателя непосредственно в фазных координатах, учитывающая 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).

Потокосцепления фаз обмотки статора магнитоэлектрической машины $[\Psi]$ можно представить в виде суммы потокосцеплений от ПМ ротора и фазных токов статора:

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

где $[\Psi_0] = [\Psi_{10} \quad \Psi_{20} \quad \dots \quad \Psi_{m0}]^t$ – матрица-столбец потокосцеплений фаз, обусловленных ПМ ротора; $[L]$ – матрица само- и взаимоиндуктивностей фаз обмотки статора; $[i] = [i_1 \quad i_2 \quad \dots \quad i_m]^t$ – матрица-столбец мгновенных фазных токов.

Относительные магнитные проницаемости высококоэрцитивных ПМ близки к единице и гораздо меньше магнитных проницаемостей стали статора. Поэтому вполне корректным представляется допущение о том, что насыщение магнитной цепи статора обусловлено действием только постоянных магнитов ротора. При этом допущении можно предварительно методами теории поля рассчитать кривые изменения потокосцеплений $[\Psi_0(\alpha)]$ от постоянных магнитов ротора в функции угла α с учетом реальной структуры активной зоны машины и насыщения стали. Элементы матрицы $[L]$ при известном угле α могут быть опре-

делены аналогичным образом. Для этого необходимо рассчитать поле в линеаризованной активной зоне ($\mu = const$) 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. Если ротор не имеет ферромагнитных вставок, то элементы симметричной матрицы $[L]$ не будут зависеть от угла поворота ротора $[L]$ и могут быть определены при расчете поля для одного произвольного взаимного положения сердечников. Величина электромагнитного момента такого двигателя при угле α будет равна

$$M_{\vartheta} = [i]^t \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha}. \quad (2)$$

Улучшение виброшумовых характеристик двигателя непосредственно связано с уменьшением пульсаций электромагнитного момента. На рис.1 в качестве примера приведены кривые изменения электромагнитного момента при номинальных синусоидальных фазных токах и установившейся частоте вращения соответственно трехфазного (1) и пятифазного (2) двигателей, имеющих одинаковые конструктивные исполнения, число зубцов статора $Z_1=36$, число полюсов $2p=4$, номинальный момент $M_{\vartheta} = 170$ Нм, номинальный ток $I_n=9,2$ А и одинаковые числа витков в катушках.

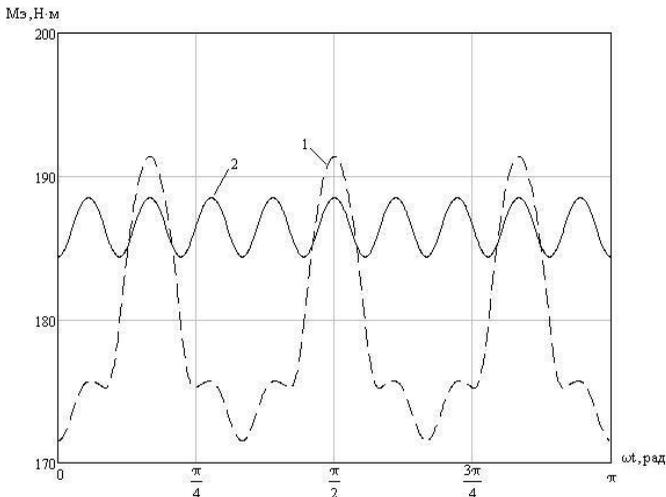


Рис.1. Пульсации электромагнитного момента трехфазного (1) и пятифазного (2) двигателей

Число катушек на полюс и фазу $q_k = 3$ для трехфазной обмотки и $q_k = 1$ для девятифазной. Как следует из полученных результатов, пульсации момента девятифазного двигателя значительно меньше, их основная частота выше (прямо пропорционально увеличению числа фаз), чем у трехфазного, а средний момент – больше.

При наличии в системе управления машины 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, что при установившейся частоте вращения $\Omega = \text{const}$ фазные токи статора должны изменяться по синусоидальному закону с амплитудной модуляцией таким образом, чтобы при заданном угле α относительно оси первой фазы статора величина электромагнитного момента оставалась неизменной в любой произвольный момент времени t . То есть будем считать, что для каждой k -й ($1 \leq k \leq m$) фазы статора

$$i_k = I_m(t) \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi(k-1)}{m}\right), \quad (3)$$

где $I_m(t)$ – модулированная амплитуда тока.

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

$$I_m(t) = \frac{M_{\dot{\gamma}}}{[S] \frac{d[\psi_0]}{d\alpha}}, \quad (4)$$

где

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

Проведенные исследования показали, что при использовании амплитудной модуляции токов для исключения пульсаций электромагнитного момента токи всех фаз многофазного магнитоэлектрического двигателя имеют одинаковую форму и гармонический состав. При этом амплитудная модуляция убывает с ростом числа фаз.

Предложенная математическая модель является универсальной и позволяет анализировать как статические, так и динамические режимы работы магнитоэлектрических многофазных электроприводов с учетом реальной структуры магнитного поля в активной зоне без использования понятия пространственных гармонических.

Многофазный синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками

Магнитные шумы обусловлены магнитными силами, изменяющимся во времени и пространстве и действующими между отдельными частями машины. Они могут быть вызваны радиальными, тангенциальными и осевыми магнитными силами. Если тангенциальные силы являются функциями электромагнитного момента, то радиальные определяются силами, вызывающими деформацию статорного кольца, то есть являются функцией пространственного распределения индукции в воздушном зазоре машины. Широкие возможности целенаправленного воздействия на конфигурацию магнитного поля, а следовательно, на виброшумовые характеристики, открывает увеличение числа фаз статорной обмотки, что позволяет оптимизировать целый спектр других технико-экономических показателей электропривода (ЭП) [1].

Снижение шумов и вибраций путем применения многофазных машин ($m > 3$) обусловлено уменьшением тангенциальных сил, вызванных пульсациями электромагнитного момента СД. Это связано с тем, что увеличение числа фаз статорной обмотки вызывает разрежение гармонического состава поля в направлении устранения из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных, обуславливающих появление дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента. Таким образом, при одинаковой форме несинусоидального питающего напряжения, многофазная система демонстрирует прямо пропорциональное увеличение частоты пульсаций электромагнитного момента при снижении их амплитуды по экспоненциальному закону, что соответственно расширяет диапазон регулирования.

Другой причиной возникновения вибраций является действующая в любой точке воздушного зазора радиальная магнитная сила, величина которой пропорциональна квадрату индукции в зазоре. Эта сила вызывает динамические деформации статорного кольца, которые соответственно являются источником магнитных шумов [2]. С ростом порядка волны плечо силы уменьшается и вибрации, вызванные ею, незначительны. Особенно большие вибрации могут вызвать второй и четвертый порядки этой силы.

При рассмотрении вопроса улучшения виброшумовых показателей ЭП следует поставить задачу компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов при сохранении требуемого электромагнитного момента:

$$F = P_{2m}^2 + \frac{\varphi}{1-\varphi} \frac{B_{rm}^2}{\delta^2} I_s^2 = \min$$

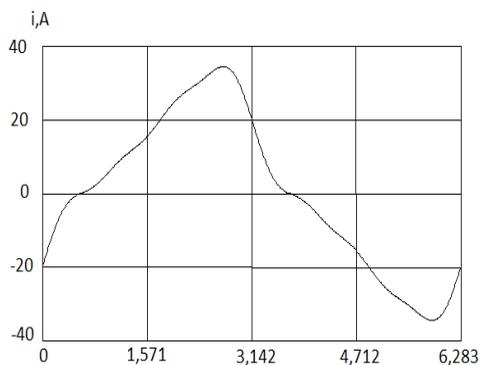
где $\varphi \in (0;1)$ – вспомогательная переменная. В целевой функции учитывается только вторая гармоника радиальной силы P_{2m} , т.к. она оказывает наиболее сильное влияние на шум и вибрацию электрической машины. Четвертая гармоника радиальной силы оказывает в 16 раз меньшее влияние на магнитный шум.

Численные эксперименты показывают, что для снижения второй гармоники радиальной магнитной силы высшие гармоники тока играют незначительную роль в отличие от продольной составляющей первой гармоники. Высшие же гармоники играют роль в снижении действующего значения тока. При этом для достижения лучшего энергетического эффекта высшие гармоники должны содержать лишь поперечную составляющую [2]. Продольная составляющая высших гармоник тока должна быть равна нулю:

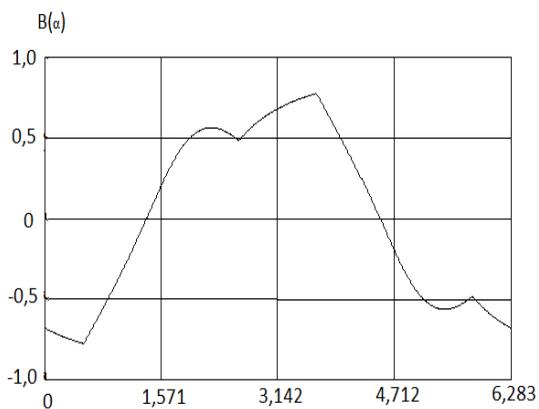
$$I_{sd(v)} = 0, v = 3, 5, \dots, m.$$

Решение задачи оптимизации разбивается на два этапа. На первом определяются значения поперечных составляющих приведенных спектральных векторов тока статора. В этом случае ставится задача минимизации действующего значения тока при обеспечении требуемого момента. На втором этапе определяется продольная составляющая первой гармоники тока статора. В этом случае ставится задача компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов. Рассчитанные функциональные зависимости вводятся в многоканальную САУ многофазными СД с улучшенными виброшумовыми характеристиками с помощью функциональных блоков.

В качестве примера на рис. 1 приведены расчетные кривые фазного тока $i(\omega t)$ и относительной магнитной индукции $B(\alpha)$ (по отношению к амплитуде синусоидальной индукции) по расточке магнитопровода 9-фазного СД ($P_n=2300$ Вт, $\omega_n=314$ рад/с) при 50%-ом снижении шума.



а



б

Рис. 1. Кривые тока (а) и относительной магнитной индукции (б)

Литература

1. **Голубев А.Н., Лапин А.А.** Многофазный синхронный регулируемый электропривод: научное издание/ГОУВПО ИГЭУ. Иваново, 2008. – 156 с.
2. **Голубев А.Н., Лапин А.А.** Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой// Электротехника. – 1998. – №9. – С. 8–13.

А.Н. ГОЛУБЕВ, д.т.н., профессор,
В.А. МАРТЫНОВ, д.т.н., профессор,
С.С. АНАНЬЕВ, к.т.н., В.Г. БЕЛОНОГОВ, инженер,
КАРАЧЕВ В.Д., аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками

Шум электрических машин и пути его устранения – это актуальная и сложная проблема. Борьба с шумом обусловлена как физиологической, так и технической причинами. Шум вызван вибрацией частей машины. Вибрирующие части испытывают большое напряжение и часто являются причиной отказов, а также старения машины.

Шумы и вибрации вызываются силами, которые могут носить магнитный и механический характер. Магнитные шумы обусловлены магнитными силами, действующими между отдельными частями машины. Шумы могут быть вызваны радиальными и тангенциальными магнитными силами. Широкие возможности целенаправленного воздействия на конфигурацию магнитного поля, а следовательно, на виброшумовые характеристики, открывает увеличение числа фаз исполнительного двигателя, в частности синхронного (СД).

Снижение шумов и вибраций путем применения многофазных машин ($m > 3$) обусловлено следующим. Уменьшаются тангенциальные силы, вызванные пульсациями электромагнитного момента СД. Это связано с тем, что увеличение числа фаз статорной обмотки вызывает разрежение гармонического состава поля в направлении устранения из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных, обуславливающих появление дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента [1].

Рассмотрим далее другую причину возникновения вибраций. В любой точке воздушного зазора действует радиальная магнитная сила, величина которой пропорциональна квадрату индукции в зазоре. Эта сила вызывает динамические деформации статорного кольца, которые соответственно являются источником магнитных шумов. Она может вызвать значительную вибрацию статора, если период пространственной волны будет достаточно большим. С ростом порядка волны плечо силы уменьшается и вибрации, вызванные ею, незначительны. Особенно большие вибрации могут вызвать второй и четвертый порядки этой силы.

Распределение радиальной силы вдоль расточки магнитопровода:

$$\begin{aligned} p(\alpha) &= \frac{1}{2\mu_0} B^2(\alpha) = \frac{1}{2\mu_0} (B_s(\alpha) + B_r(\alpha))^2 = \\ &= \frac{1}{2\mu_0} (B_s^2(\alpha) + B_r^2(\alpha) + 2B_s(\alpha)B_r(\alpha)), \end{aligned}$$

где $B_s(\alpha)$ и $B_r(\alpha)$ - распределение магнитной индукции статора и ротора вдоль зазора.

Квадраты амплитуд радиальных сил равны:

$$P_{2m}^2 = P_{2d}^2 + P_{2q}^2;$$

$$P_{4m}^2 = P_{4d}^2 + P_{4q}^2.$$

Соответственно квадрат действующего значения тока статора

$$I_s^2 = \frac{1}{2} \sum_{v=1,3}^{v < m} (I_{sq(v)}^2 + I_{sd(v)}^2)$$

и электромагнитный момент

$$M = \frac{m}{2} p \sum_{v=1,3}^{v < m} v i_r L_{m(v)} I_{sq(v)}.$$

Можно поставить задачу компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов при сохранении требуемого электромагнитного момента:

$$F = P_{2m}^2 + \frac{\phi}{1-\phi} \frac{B_{mm}^2}{\delta^2} I_s^2 = \min,$$

где $\phi \in (0;1)$ – вспомогательная переменная. В целевой функции учитывается только вторая гармоника радиальной силы, так как она оказывает наиболее сильное влияние на шум и вибрацию электрической машины. Четвертая гармоника радиальной силы оказывает в 16 раз меньшее влияние на магнитный шум.

Численные эксперименты показывают, что для снижения второй гармоники радиальной магнитной силы высшие гармоники тока играют незначительную роль в отличие от продольной составляющей первой гармоники. Высшие же гармоники играют роль в снижении действующего значения тока. При этом для достижения лучшего энергетического эффекта высшие гармоники должны содержать лишь поперечную составляющую [1]. Продольная составляющая высших гармоник тока должна быть равна нулю:

$$I_{sd(v)} = 0, v = 3, 5, \dots, m.$$

Задача оптимизации разбивается на два этапа.

1. Определение значений поперечных составляющих приведенных векторов тока статора. В этом случае ставится задача минимизации действующего значения тока

$$I_s^2 = \frac{1}{2} \left(I_{sd(1)}^2 + \sum_{v=1,3}^{v < m} I_{sq(v)}^2 \right) = \min; \sum_{v=1,3}^{v < m} I_{sq(v)}^2 = \min$$

при обеспечении требуемого момента

$$M - \frac{m}{2} p \sum_{v=1,3}^{v < m} v i_f' L_{m(v)} I_{sq(v)} = 0.$$

Результатом оптимизации является соотношение

$$I_{sq(v)} = \frac{2M}{mp} \frac{v i_f' L_{m(v)}}{\sum_{\mu=1,3}^{\mu < m} (\mu i_f' L_{m(\mu)})^2}.$$

2. Определение продольной составляющей вектора тока статора, приведенного к первой пространственной гармонике [1]. В этом случае ставится задача компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов:

$$F = P_{2d}^2 + P_{2q}^2 + \frac{\phi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_{sd(1)}^2 = \min.$$

Результатом оптимизации является соотношение

$$I_{sd(1)} = \sqrt[3]{\sqrt{p^3 + q^2} - q} - \sqrt[3]{\sqrt{p^3 + q^2} + q} - \frac{b}{2a}.$$

Здесь

$$p = \frac{4ac - b^2 + 2 \left(d^2 + \frac{\phi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} \right)}{12a^2}; q = \frac{2ade - b \left(d^2 + \frac{\phi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} \right)}{8a^3};$$

a, b, c, d, e – алгебраические функции конструктивных и электромагнитных параметров m-фазного СД.

В качестве примера на рис. 1 приведена расчетная кривая относительной магнитной индукции $B(\alpha)$ (по отношению к амплитуде синусоидальной индукции) по расточке магнитопровода 9-фазного СД ($P_H = 2300$ Вт, $\omega_H = 314$ рад/с) при 50%-ом снижении шума.

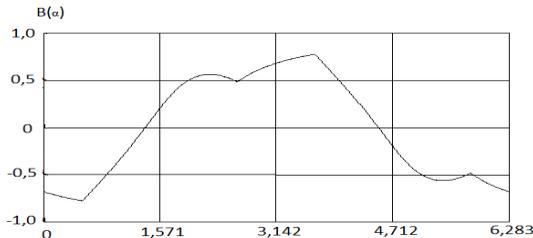


Рис. 1. Кривая относительной магнитной индукции

По приведенным соотношениям рассчитываются нелинейные зависимости функциональных элементов многоканальных САУ многофазными СД с улучшенными виброшумовыми характеристиками.

Литература

1. Голубев А.Н., Лапин А.А. Многофазный синхронный регулируемый электропривод/ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 156 с.

УДК 621.317.334

Д.Ю. МОРОЗОВА, студент,
М.С. САЙКИН, к.т.н., доцент, (ИГЭУ)

Исследование влияния формы магнитов на распределение магнитной индукции в магнитожидкостном датчике

Магнитожидкостные датчики (МЖД) имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими типами датчиков. Они заключаются в высоком быстродействии, широком диапазоне измеряемых величин, большей точности контролируемых параметров систем автоматического регулирования техническими объектами.

Простейшие МЖД, у которых в качестве чувствительного элемента используется магнитная жидкость (МЖ), имеют следующие технические характеристики [1]:

- точность, минимальный угол, град. угл. ± 1 ;
- диапазон измеряемых углов, град. угл. до ± 90 ;
- диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$ ± 60 ;

Для повышения быстродействия МЖД в качестве чувствительного элемента используется стальной сердечник 1 и два постоянных магнита 2, подвешенных в МЖ 3 внутри немагнитного корпуса 4 (рис.1). Осевая составляющая силы тяжести уравновешивается силой отталкивания со стороны постоянных магнитов 5, которые установлены в крышках 6. Дифференциальная трансформаторная схема 7 фиксирует перемещение чувствительного элемента, а отверстие 8 выполнено для снижения газодинамического сопротивления при движении подвижного элемента. В данной конструкции МЖД используются постоянные магниты в форме дисков.

Для повышения быстродействия датчика за счет снижения сопротивления движению подвижного элемента, предложена конструкция датчика, в которой используются кольцевые постоянные магниты [2].

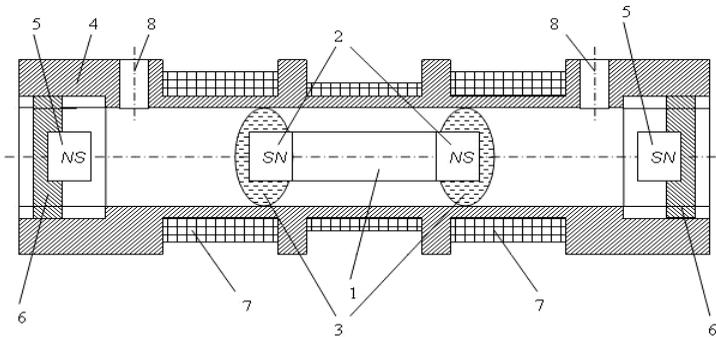


Рис. 1. Конструкция магнито-жидкостного датчика с дисковыми постоянными магнитами

На рис. 2 представлена конструкция датчика, состоящего из корпуса 1, измерительных обмоток 2, крышек 3, в которых установлены кольцевые постоянные магниты 4. Чувствительный элемент состоит из кольцевых постоянных магнитов 5 и магнитопроводной втулки 6 со сквозным отверстием. Чувствительный элемент левитирует в МЖ 7.

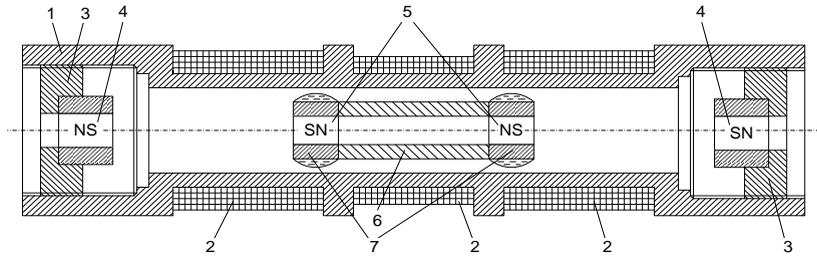


Рис. 2. Конструкция магнито-жидкостного датчика с кольцевыми постоянными магнитами

Целью работы является сравнение значений магнитной индукции между обращенными друг к другу одноименными полюсами магнитов подвижного элемента 5 и центрирующими магнитами 4.

В качестве магнитов рассматривались «закритические» магниты с величиной остаточной магнитной индукции $B_r = 0,77-1,1$ Тл и коэрцитивной силы $H_c = 540-800$ кА/м. Исследовались магниты в форме дисков и в форме колец. Кольцевые и дисковые магниты имели внешние диаметры $D=8-20$ мм, а внутренние отверстия кольцевых магнитов составляли $d=2-4$ мм, длина в направлении намагничивания составляла $h=2-3$ мм. Отношение расстояния между магнитами l к диаметру D изменялось в диапазоне от 0,2 до 1,8 с шагом 0,2 (рис. 3–5).

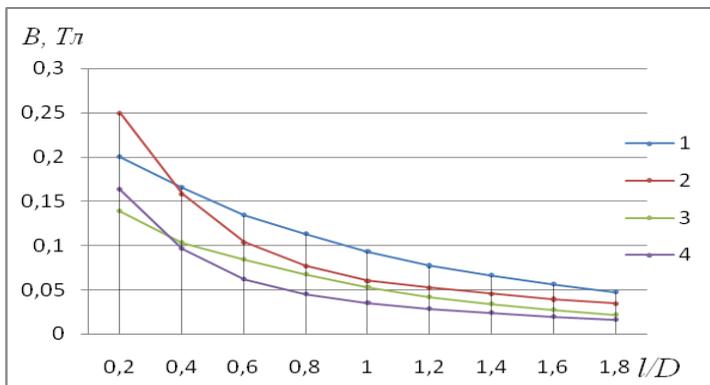


Рис. 3. Зависимости величины магнитной индукции на оси симметрии МЖД от величины l/D ; для дисковых магнитов 1 – $D=8$ мм, 2 – $D=20$ мм. Для кольцевых магнитов 3 – $D=8$ мм, $d=2$ мм, 4 – $D=20$ мм, $d=4$ мм. $H_c=560$ кА/м, $B_r=0,77$ Тл.

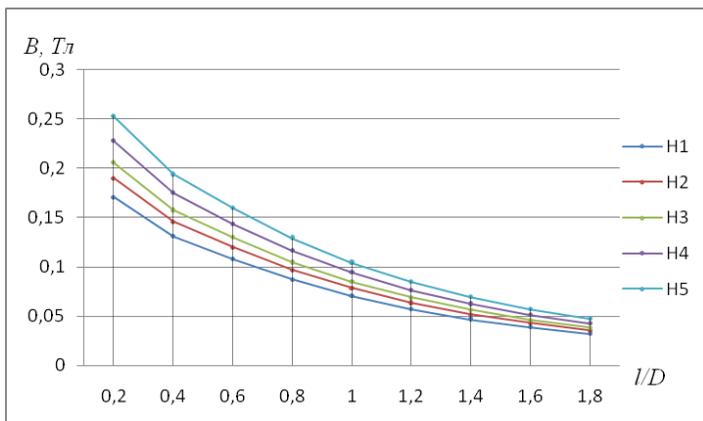


Рис. 4. Зависимости величины магнитной индукции на оси симметрии МЖД с дисковыми магнитами от величины l/D , $D=10$ мм; $H_1=500$, $H_2=560$, $H_3=650$, $H_4=720$, $H_5=800$ кА/м

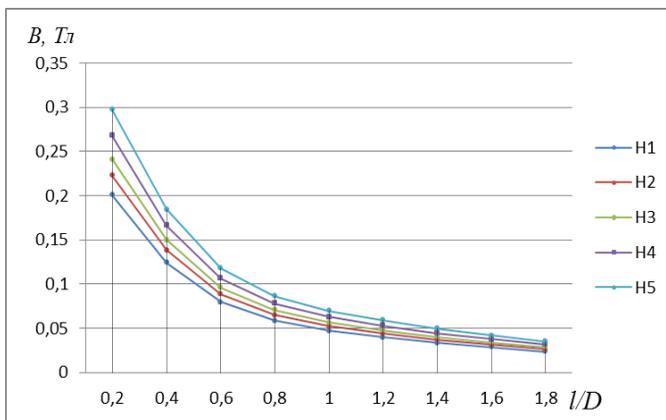


Рис. 5. Зависимости величины магнитной индукции на оси симметрии МЖД с кольцевыми магнитами от величины l/D ; $D=10$ мм; $H_1=500$, $H_2=560$, $H_3=650$, $H_4=720$, $H_5=800$ кА/м

Литература

1. Бойко Н.Г., Касаткин С.А., Ключнин А.В. Магнитожидкостные датчики угла наклона, давления, ускорения./ Механизация и автоматизация производства. №4, 1990. С.14.
2. Сайкин М.С., Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 113349, МКИ G01C 9/00, Приоритет от 18.10.2011, опубли. 10.02.2012, Бюл. N 4.

УДК 621.314

С.С. НОВИКОВА, студент,
М.С. САЙКИН, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), Иваново

Исследование длины и направления намагничивания магнитов на распределение магнитной индукции в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов

Магнитожидкостный герметизатор (МЖГ) содержит следующие основные элементы магнитной цепи: постоянный магнит и магнитопровод, состоящий из полюсных приставок, вала, которые образуют замкнутую магнитную цепь. В зазоре, образованном между внутренними цилиндрическими поверхностями полюсных приставок и вращающемся валом, находится магнитная жидкость (МЖ), которая удерживается

пондеромоторной силой и создает барьеры для предотвращения натекания герметизируемой среды из внутреннего объема в атмосферу.

При работе МЖГ с агрессивными химическими средами они воздействуют на элементы магнитной цепи. Интенсивность воздействия агрессивной среды определяется ее концентрацией и температурой.

Для материалов магнитопровода применяются коррозионно-стойкие стали [1]. Обязательным требованием, предъявляемым к МЖ, является отсутствие процессов ее смешения и химического взаимодействия с уплотняемой средой.

Постоянные магниты должны быть изготовлены из «закрытических» материалов, имеющих высокое значение температуры Кюри.

С целью исключения воздействия агрессивной среды на постоянные магниты предлагаются конструкции, представленные на рис.1 и 2.

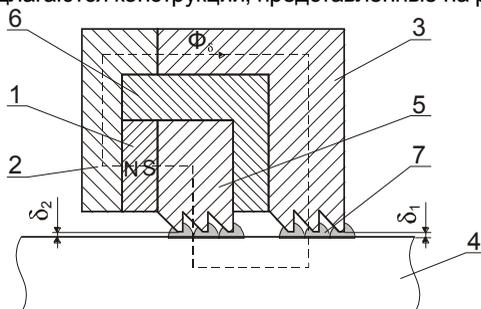


Рис. 1. Магнитожидкостный герметизатор с осевым намагниченным магнитом

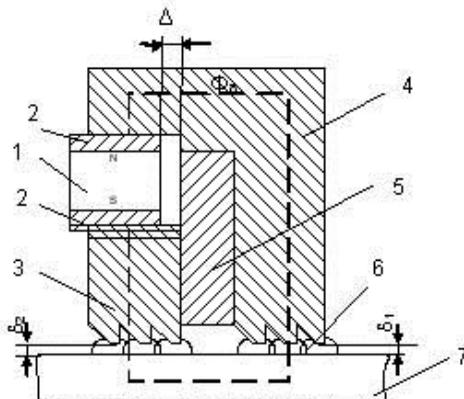


Рис. 2. Магнитожидкостный герметизатор с радиально-намагниченным магнитом

Конструкция МЖГ (рис. 1) состоит из постоянного магнита 1, намагниченного в осевом направлении, полюсной приставки, состоя-

щей из двух частей 2,3, вращающегося вала 4, и полюсной приставки 5. Для фиксации деталей магнитопровода МЖГ между ними расположена немагнитопроводная втулка 6. МЖ 7 находится в рабочих зазорах δ_1 и δ_2 [2].

Конструкция МЖГ (рис. 2) состоит из постоянного магнита 1, помещенного в магнитопроводную втулку 2, которая примыкает к полюсным приставкам 3 и 4. На внутренней цилиндрической поверхности магнитопроводной втулки 2 и наружной цилиндрической поверхности полюсной приставки 3 выполнена резьба. Для фиксации деталей магнитопровода служит немагнитопроводная втулка 5. МЖ 6 находится в рабочих зазорах δ_1 и δ_2 между полюсными приставками 3 и 4 и вращающимся валом 7.

Целью работы является исследование влияния длины и направления намагничивания постоянных магнитов на распределение магнитной индукции в рабочих зазорах МЖГ. Площадь поверхности постоянных магнитов, примыкающих к полюсным приставкам, для обеих конструкций одинакова. Длина магнита в направлении намагничивания изменялась в диапазоне от 1 до 7мм.

В качестве исходных данных геометрии рабочего зазора МЖГ для обеих конструкций выбирались следующие: величина рабочего зазора $\delta_1=\delta_2=0.15\text{мм}$, шаг зубца $b=4\text{мм}$, величина площадки при основании зубца $t=0.4\text{мм}$, угол при основании $\alpha=45^\circ$. Зубцы выполнены в форме прямоугольной трапеции. Параметры постоянных магнитов были следующие: 1) $B_r=0.77\text{Тл}$, $H_c=540\text{кА/м}$; 2) $B_r=0.9\text{Тл}$, $H_c=700\text{кА/м}$; 3) $B_r=1.02\text{Тл}$, $H_c=760\text{кА/м}$. Полюсные приставки и вал были выполнены из Стали 20Х13 с индукцией насыщения $B_s=...$ при напряженности магнитного поля $H_c=...$ Расчёты выполнены в интегрированной среде ELCUT.

Результаты расчётов представлены на рис. 3, 4.

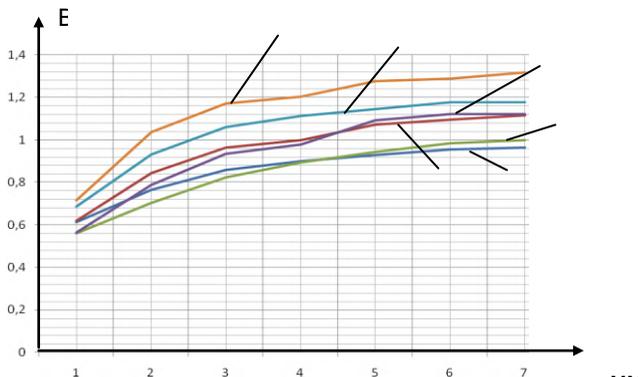


Рис. 3. Изменение максимальной индукции под зубцом МЖГ

1- $B_r=0.77\text{ Тл}$, 3- $B_r=0.9\text{ Тл}$, 5- $B_r=1.02\text{ Тл}$ – осевое намагничивание магнитов
 2- $B_r=0.77\text{ Тл}$, 4- $B_r=0.9\text{ Тл}$, 6 – $B_r=1.02\text{Тл}$ – радиальное намагничивание магнитов

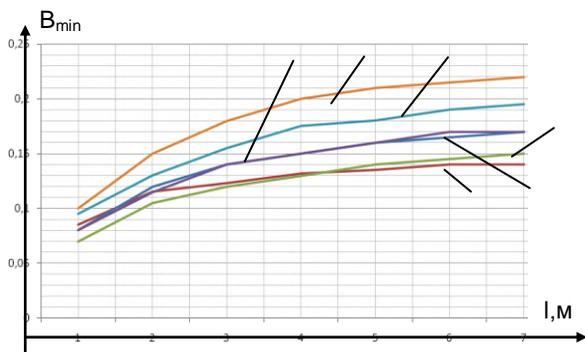


Рис.4 Изменение минимальной индукции под зубцом МЖГ

1- $B_r=0.77$ Тл, 3 – $B_r=0.9$ Тл , 5- $B_r=1.02$ Тл – осевое намагничивание магнитов
 2- $B_r=0.77$ Тл, 4- $B_r=0.9$ Тл , 6- $B_r=1.02$ Тл – радиальное намагничивание магнитов

Анализ расчетных зависимостей показывает, что применение конструкции с радиально намагниченными магнитами приводит к повышению максимальной индукции под зубцом B_{max} от 1 до 14%, а минимальной индукции B_{min} от 4 до 21%. Таким образом повышение перепада давлений ΔP для МЖГ с радиальным намагничиванием магнитов составила от 2 до 15%.

Литература

1. **Томашов Н.Д., Чернова Г.П.** Теория коррозии и коррозионностойкие конструкции сплавов, - Л.:Химия, 1988, с. 327.
2. **Сайкин М.С., Морозова Д.Ю., Фёдорова О.Е.** Магнитожидкостное уплотнение. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 113325, МКИ F16J 15/54, Приоритет от 12.10.2011, опубл. 10.02.2012, Бюл. N 4.

УДК 621.365.5

А.В. БОЗРИКОВ, аспирант,
 И.Н. АНТОНОВ, д.т.н., профессор,
 (СГТУ им. Гагарина Ю.А.), г. Саратов

Создание композиционного материала с заданными диэлектрическими свойствами

Объективные потребности развития различных отраслей производства и техники обусловили создание новых конструкционных материалов с высоко прочностными характеристиками при минимизации их массы. Это становится возможным при изготовлении композиционных материалов на полимерной основе.

Одним из основных технологических процессов обработки материалов и изделий является термообработка, в том числе диэлектриков. Термообработку диэлектриков можно осуществлять различными способами, включая СВЧ диэлектрический нагрев.

В качестве основы создаваемого композиционного материала берется какой-либо полимер с различными наполнителями или без таковых.

Анализ литературных источников показал, что такой полимер, как, например, битум не взаимодействует с электромагнитным полем ВЧ и СВЧ. Однако, зная, что СВЧ диэлектрический и индукционный нагрев являются объёмными, можно предположить, что композит будет нагреваться, если в объёме матрицы распределить частицы, взаимодействующие с СВЧ излучением, либо с магнитным полем индуктора.

Композиционные материалы с токопроводящим наполнением могут быть использованы для: склеивания, создания гидроизоляции, создания экранирующих от электрических полей и радиочастотного излучения материалов.

Электропроводящие шары радиуса R размещаются равномерно в электронейтральной неполяризуемой бесконечной трехмерной среде с температурой T_0 (рис. 1).

Для начального момента времени $t=0$ пусть температура шара будет $T_1 > T_0$ и поддерживается такой внешним источником (СВЧ полем), величина этой температуры определяет области плавления среды.

Температуропроводность среды λ , ее удельная теплоёмкость C и плотность ρ .

Выразим температуры в любой точке среды вне сферы для момента времени $t > 0$, определим распределение температуры в среде при $t \rightarrow \infty$ от одной сферы, считая, что они располагаются друг от друга на расстоянии, когда их взаимного, влияния нет или области I и II распространения температур полей не пересекаются (рис. 2).

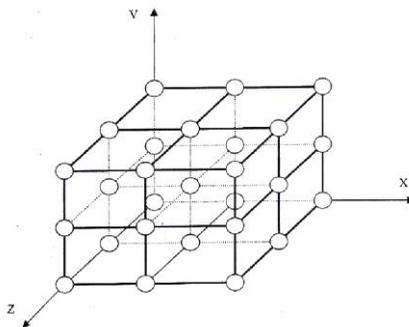


Рис. 1. Матрица из электропроводящих частиц в диэлектрической среде без поляризации

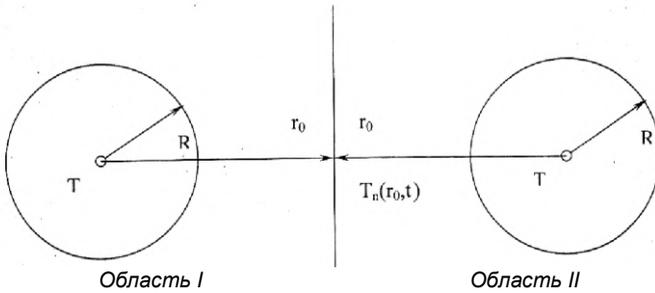


Рис. 2. Распределение температуры в диэлектрической среде

Распределение температуры T определяется уравнением теплопроводности

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

Решение представим в виде:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{R}{r} H(r, t), \quad (2)$$

где $H(r, t)$ удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial^2 H}{\alpha r^2} - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия:

а). $r = R, t > 0, H(R, t) = T_1 - T_0,$

б). $r > R, t = 0, H(r, 0) = 0;$

Выразим решение уравнения (3) через функцию Грина

$$G(r, t | r^1, t^1), \quad (4)$$

Вычислим G , для этого рассмотрим функцию G_0 :

$$G_0 = \frac{a^2}{2\pi} h(t - t^1) \int e^{-k^2 a^2 (t - t^1) + jk(r - r^1)} dk = \frac{ah(t - t^1) e^{-\frac{(r - r^1)}{4a^2(t - t^1)}}}{\sqrt{4\pi(t - t^1)}} \quad (5)$$

Воспользуемся методом изображений в электростатике и зададим G в виде

$$G = G_0(r - r^1, t - t^1) - G_0(2R - r - r^1, t - t^1) \quad (6)$$

Следовательно, температура определяется выражением

$$T(r, t) = T_0 t \frac{R(T_1 - T_0)}{2ar\sqrt{\pi}} \int_0^1 \frac{e^{-\frac{(r-R)^2}{4a^2(t-t^1)}}}{(t-t^1)^{\frac{3}{2}}} dt^1 \quad (7)$$

При $t \rightarrow \infty$ интеграл стремится к своему предельному значению, поэтому

$$T \rightarrow T_0 + \frac{-(T_1 - T_0)R}{r} \quad (8)$$

что и следовало ожидать, для статической задачи с граничными условиями $T(R) = T_1$ и $T(r) = T_0$ при $t \rightarrow \infty$

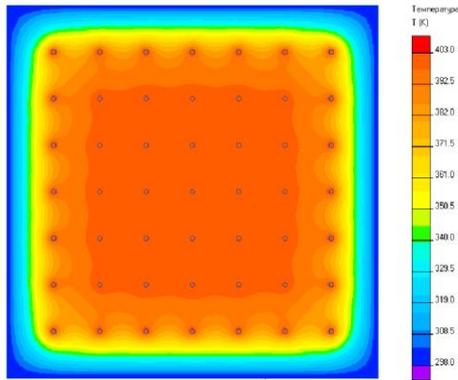


Рис. 3. Распределение температурных полей в композиционной матрице

Описанная выше математическая модель позволяет оценить распределение частиц в плоскости и в пространстве, оптимизировать расстояние между ними, что позволяет сформировать температурное поле в матрице вплоть до ее плавления. В программной среде ELCUT была построена упрощенная двумерная модель для заданных свойств среды, при этом были использованы результаты математического моделирования (рис. 3).

В настоящее время в лабораторных условиях испытаны композитные материалы, обладающие перечисленными выше свойствами. Необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования для выработки технических решений при создании установки под необходимый технологический регламент и соответствующий ему композиционный материал.

Литература

1. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – 279 с.
2. **Окресс Э.** СВЧ-энергетика / Э. Окресс – М.: Мир, 1971., Т. 2. – 272 с.

Управление интенсивностью движения кабельного напольного транспортного средства при работе в условиях повышенной температуры окружающей среды

В процессе интенсивной эксплуатации электрооборудования напольных транспортных средств с питанием от электрической сети [1, 2] в закрытых складских и производственных помещениях промышленного предприятия в течение непродолжительного времени по причине аномально жаркой погоды летнего периода наблюдалось резкое повышение уровня отказов силовой части и системы управления. Введение дополнительного охлаждения к уже имеющейся системе охлаждения электрооборудования удовлетворительных результатов не дало по причине недостатка места на борту транспортного средства, а также особенностей размещения уже имеющегося электрооборудования. Проведение в данном случае серьезной реконструкции электрооборудования, ориентируясь на сохранении работоспособности электрооборудования в полном объеме в течение непродолжительного периода аномальной жары, является экономически нецелесообразным.

Альтернативным вариантом обеспечения бесперебойной работы электрооборудования в этом случае могло бы быть частичное ограничение интенсивности движения транспортного средства. С этой целью в системе управления электроприводом передвижения предусмотрен датчик температуры ДТ (рис.1), который предназначен для измерения температуры в бортовом отсеке размещения электрооборудования.

Вычислительное устройство ВУ в зависимости от этой температуры, воздействуя на задатчик интенсивности ЗИ, уменьшает ускорение движения транспортного средства. При этом уменьшается ток якоря I_y электродвигателя системы передвижения, вызывая уменьшение мощности выделяющейся в элементах оборудования (трансформаторах, сглаживающих дросселях, радиаторах, тиристорах и т.д.), что приводит к уменьшению температуры в отсеке.

Описываемая система реализована на однотонном электропогрузчике типа ЭП-103К, электродвигатель с последовательным возбуждением типа РТ-13Б: $P_n = 3$ кВт; $U_n = 40$ В; $I_n = 100$ А. Моменты инерции $J_1 = 1,29$ кг · м²; $J_2 = 1,08$ кг · м².

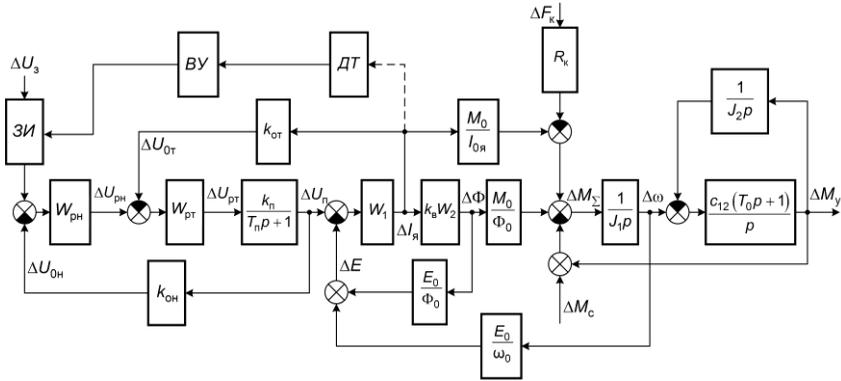


Рис. 1. Структурная схема электропривода передвижения кабельного напольного транспортного средства с ограничением интенсивности движения

На структурной схеме электропривода передвижением обозначены:

$W_{рн}(p)$, $W_{пт}(p)$ – передаточные функции регуляторов тока и напряжения. R_k , F_k – радиус кабельного барабана и сила натяжения кабеля; M , M_y – момент двигателя и момент упругого взаимодействия; Φ , \dot{A} – магнитный поток и противоэдс двигателя; k_n , T_n – коэффициент передачи, постоянная времени тиристорного преобразователя; $k_{от}$, $k_{он}$ – коэффициенты передачи цепей обратных связей по току и напряжению; k_b – коэффициент передачи цепи возбуждения.

Передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{T_1 p + 1}{R_1(a_2 p^2 + a_1 p + 1)}; W_2(p) = \frac{T_{32} p + 1}{T_1 p + 1};$$

$$a_1 = T_{11} + T_{21} + T_{22} + T_{32}; a_2 = T_1 T_{11} + T_{21} T_{22}; T_1 = T_{22} + T_{32};$$

$$R_1 = R_{я} + R_b,$$

где $T_{ij} = \frac{L_i}{R_j}$, $j = 1, 2, 3$; $i = 1, 2$; $L_1, R_{я}$ – индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря, L_2, R_b – индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения; L_3, R_2 – индуктивность и активное сопротивление участка цепи, по которой протекают вихревые токи.

Контур регулирования тока настраивается по условию модульного оптимума. Передаточная функция регулятора тока совпадает с передаточной функцией реального ПИД-регулятора

$$W_{PT}(p) = k_{пр} \frac{\alpha T_{и}^2 p^2 + T_{и} p + 1}{T_{и} p (T_{б} p + 1)},$$

где

$$k_{пр} = \frac{k_{п} a_1 R_1}{2 k_{от} T_{п}}; \alpha = \frac{a_2}{a_1^2}; T_{б} = T_1.$$

Регулятор напряжения $W_{\delta i}(p)$ и задатчик интенсивности ЗИ выбираются из условия обеспечения требуемой плавности передвижения транспортного средства.

Литература

1. Пат. 2185296 RU, МКИ60L9/00. Устройство для электроснабжения и управления безрельсовым транспортом / Котенев В.И., Котенев А.В., Котенев В.В., Шайдуров И.А. №200013771/28; Заявлено 18.12.2000; Оpubл. 20.07.2002; Бюл. № 20.
2. Котенев А.В., Котенев В.В., Котенев В.И., Серюгин С.В. Электропривод натяжения промежуточного кабеля системы электроснабжения напольного транспортного средства // Известия вузов. Электромеханика. 2011 №3. С.66-69.

УДК 621.315

С.В. МИТРОФАНОВ, к.т.н., доцент
А. Е. ЖАВОРОНКОВ, студент
(ОГУ), г. Оренбург

Перспективы использования метода измерения частичных разрядов и его современное состояние при диагностике изоляции кабельных линий

В России все больший интерес приобретают системы диагностики кабелей методом измерения частичных разрядов (ИЧР). Это обусловлено тем, что сети постепенно переходят на кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, проведение монтажных работ, с которыми без последующего обязательного диагностирования данным методом при вводе в эксплуатацию может обернуться развитием дефектов, которые практически не выявляются приемо-сдаточными испытаниями повышенным напряжением [1]. В мире широко известно множество механизмов измерения уровня и локализации частичных разрядов (оптические, акустические), оценка которого позволяет выявлять повреждения на раннем этапе и говорить о превентивной системе неразрушающей диагностики. Рассмотрим электрические механизмы ИЧР.

Процессы в изоляции под воздействием ЧР, т.е. микроразрядов, возникающих в местах неоднородности изоляции, к настоящему времени достаточно изучены. В кабелях с бумажно-пропитанной и пластмассовой изоляцией ЧР возникают в воздушных включениях и микротрещинах. Кроме того, в процессе эксплуатации таких кабелей возможно образование пустот в изоляции вследствие неизбежных многократных циклов нагрева и охлаждения. Эти процессы при интенсивном протекании приводят к пробое изоляции. При длительном приложении напряжения ЧР развиваются в газовых включениях (в возможных технологических дефектах). ЧР в большинстве случаев являются причинами зарождения ветвистых побегов – электрических триингов, приводящих к пробое изоляции. В полиэтиленовой изоляции при попадании влаги возникают водные триинги.

При проведении диагностики КЛ методом ИЧР существует два основных подхода: диагностика КЛ под рабочим напряжением и диагностика КЛ, отключенной от питающей сети. Диагностика первым способом может осуществляться как дистанционно, так и с помощью датчиков, непосредственно подключенных к диагностируемой КЛ (между оболочкой кабеля и землей). При измерениях характеристик ЧР на КЛ, отключенной с двух сторон, измерительная схема электрически не связана с внешней сетью, что значительно уменьшает уровень помех.[2]

Рассмотрим принцип одного из самых современных и эффективных методов – метод измерения и локализации частичных разрядов осциллирующим затухающим напряжением (OWTS – oscillating wave test system). Система OWTS позволяет определять величину и место расположения ЧР, количество ЧР в локальных местах КЛ, величину напряжения возникновения и гашения ЧР, а также тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции и ряд других величин.[2] По совокупности этих параметров может быть сделано обоснованное заключение о техническом состоянии изоляции диагностируемой КЛ. Схема установки представлена на рис. 1.

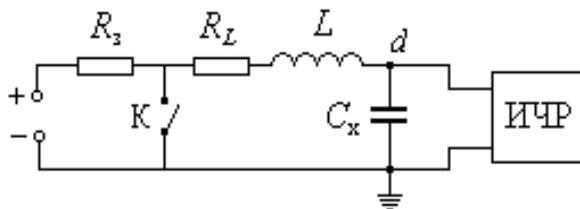


Рис. 1. Принципиальная схема диагностики методом OWTS [2]

R_3 – зарядное сопротивление; L – катушка индуктивности;
 R_L – активное сопротивление обмотки катушки индуктивности;
 K – высоковольтный ключ; ИЧР – измеритель ЧР

Диагностика выполняется на КЛ, отсоединенной с двух сторон. Производится калибровка системы, с целью уточнения длины КЛ и определения ожидаемой амплитуды ЧР. После калибровки каждая фаза КЛ последовательно заряжается в течение нескольких секунд постоянным напряжением до величины, не превышающей номинального напряжения КЛ, и затем соединяется с заземленным экраном кабеля через резонансную катушку с воздушным сердечником посредством коммутации высоковольтного электронного ключа. В процессе разрядки возникают затухающее колебательное напряжение между экраном и фазой, частота которого зависит от емкости диагностируемого объекта и составляет от пятидесяти до нескольких сотен герц. Бегущая волна инициирует ЧР в изоляции, которые фиксируются и сохраняются в памяти компьютера системы OWTS для последующей обработки с целью определения амплитуды и местоположения ЧР по длине КЛ. Колебательное напряжение прикладывается к объекту диагностики в течение десятых долей секунды, и потому не повреждает его. Локализация ЧР осуществляется по результатам регистрации двух импульсов от одного и того же ЧР – первичного импульса и импульса, отраженного от конца КЛ. Общепринятой единицей измерения частичных разрядов является пикокулон (пКл). Из зарубежной практики известны пограничные значения уровня ЧР в одной локальной точке, при достижении или превышении которых необходимо периодическое наблюдение за состоянием кабеля в течение 3-6 месяцев после диагностики, они равны для кабеля с бумажно-пропитанной и пластмассовой изоляцией соответственно 10000 пКл и 20 пКл [3].

Другим механизмом измерения частичных разрядов, по возможности, не уступающим OWTS, отличительной особенностью которого является диагностика КЛ без вывода в ремонт – это разработка компании HVPD «Longshot» (рис. 2).

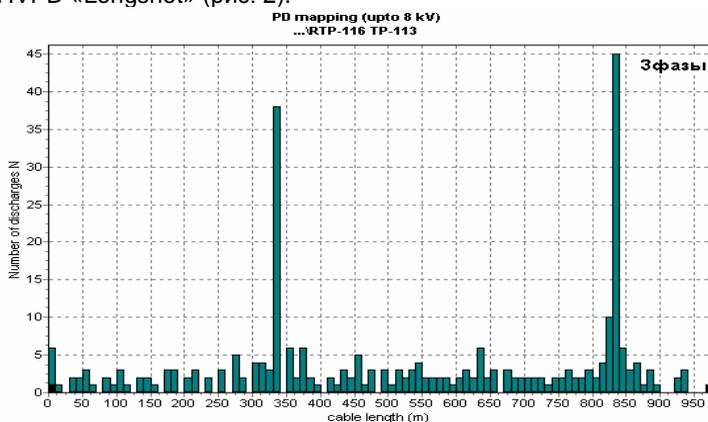


Рис. 2. Вид гистограммы ЧР для трех фаз КЛ

Принцип ее действия основан на применении двух типов датчиков: индуктивного (HFCT – высокочастотного трансформатора тока) и емкостного (TEV – датчик переходного напряжения на землю, регистрирует напряжение импульсов частичных разрядов протекающих по поверхностям оборудования). HFCT устанавливаются вокруг вывода экрана или каждой жилы кабельной линии. Когда во внутренней структуре изоляции (между фазой и заземлённым экраном) возникает ЧР, в обоих проводниках генерируется импульс, ток ЧР для проводника равен +i, ток ЧР в заземлённом экране -i). Импульсы ЧР регистрируются за 1 период промышленной частоты, а для обработки полученных результатов специальное ПО. Сама установка Longshot, по разъяснению специалистов компании, представляет собой осциллограф, основу функциональности системы создают вышеупомянутые датчики, и программа, в которой заложена программная модель распознавания импульсов [1].

Сочетание системы постоянного контроля уровня ЧР в узлах электроснабжения и неразрушающей диагностики отдельных КЛ путем измерения и локализации ЧР позволит эффективно предупреждать аварийные ситуации на эксплуатирующемся оборудовании и, в целом, будет способствовать повышению надежности и обеспечению бесперебойности электроснабжения. Экономическая целесообразность применения такой системы диагностики, позволяющей на ранней стадии выявить процессы развития повреждений в изоляции КЛ, очевидна (предупреждение производственных потерь при внезапных отказах КЛ, возможность проведения ремонтов КЛ в плановом порядке и др.)[2].

Литература

1. **Д. Копченков, Н. Синицкая, А. Петров** Диагностика оборудования и кабельных линий без вывода в ремонт.– «КАБЕЛЬ-news», № 1, 2012.
2. **И. Н. Привалов** Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно.– Учеб. пособие.– Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов, СПб 2008 г.
3. **Frank Petzold, Mikhail Zakharov** PD Diagnosis on Medium Voltage Cables with Oscillating Voltage (OWTS) <http://www.sebakrmt.com/fileadmin/files/applikationsschriften/pruefung/4-diagnosis-medium-voltage-owts-en.pdf>

Разработка системы управления источником питания аргодуговой 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 аргодуговая сварка [1].

Преимуществом аргодуговой 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].

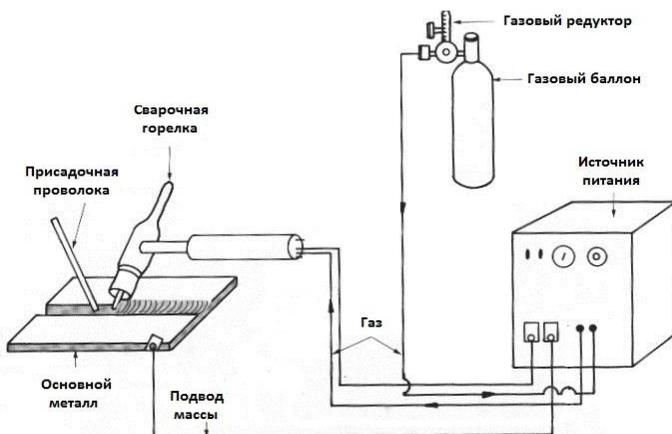


Рис. 1. Оборудование для аргодуговой сварки

Структура инверторного источника питания и устройство сварочной горелки показаны на рис. 2–3.

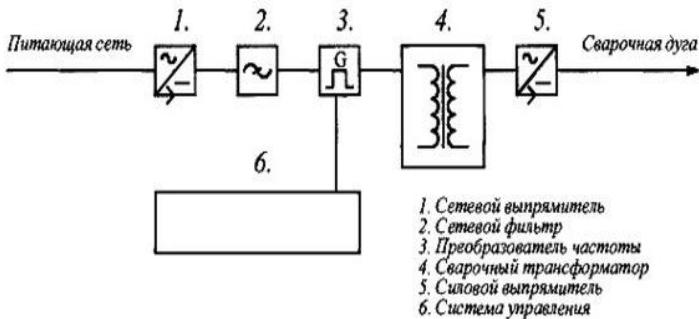


Рис. 2. Структура инверторного источника питания

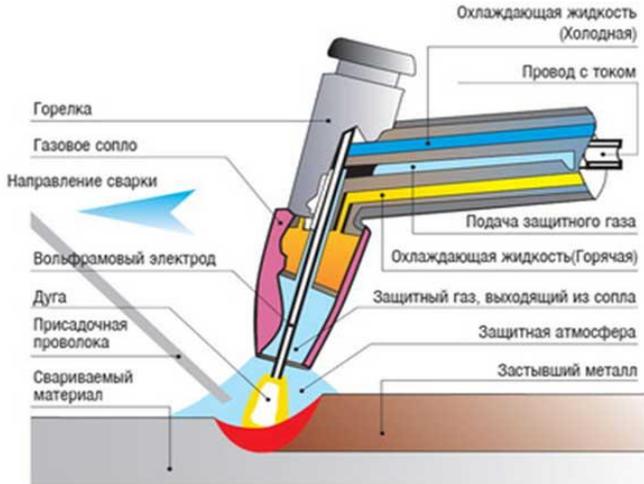


Рис. 3. Конструкция сварочной горелки

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 однокристально-го микроконтроллера.

В данной работе было разработано устройство управления к инвертору для аргодуговой сварки, составлены схемы и алгоритмы для микроконтроллера. В устройстве использован микроконтроллер сред-

него 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.

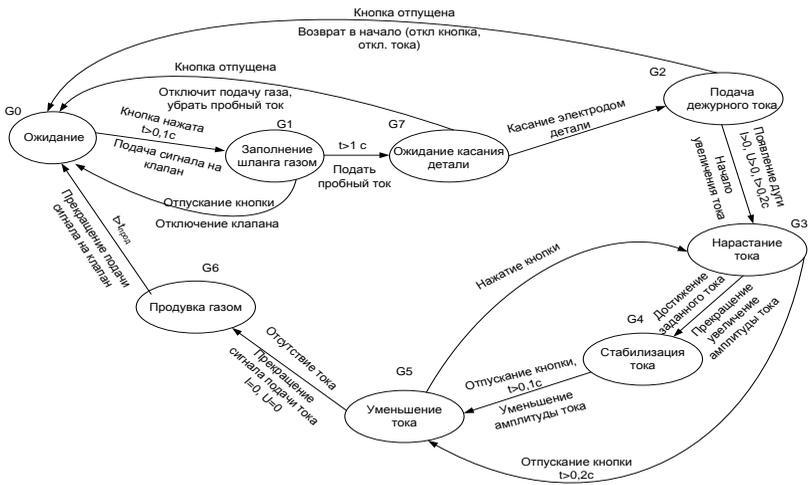


Рис. 4. Граф, описывающий алгоритм управления объектом

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

;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,

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

Литература

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

Подсекция «ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ»

УДК 621.317

В.Ю. КОЖЕВНИКОВ, к.т.н., доцент,
Д.В. ДИХОР, магистр,
Е.А. ДОБРЮЛЮБОВА, магистр
(СГТУ им. Ю.А. Гагарина), г. Саратов

Исследование диэлектрических параметров водного раствора наночастиц серебра

В последние годы очень быстро развивается такая область науки, как нанотехнологии. Это связано с характеристиками получаемых материалов, не доступных для «обычных» материалов. Одним из самых интересных и уникальных металлов является серебро. Уникальность наночастиц серебра заключается в их бактерицидных свойствах, что находит применение в медицине, экологии и во многих других отраслях.

Одним из наиболее перспективных способов синтеза наночастиц серебра в водных растворах является метод химического восстановления при СВЧ воздействии [1]. При данном способе размер образующихся частиц лежит в диапазоне 0,7–2,8нм.

СВЧ установка проточного типа состоит из следующих основных узлов: источника СВЧ энергии, линии передачи, рабочей камеры с бегущей волной, системы загрузки выгрузки и системы управления.

В свою очередь для проектирования рабочей камеры СВЧ установки необходимо знать значения диэлектрических параметров обрабатываемого вещества, какими являются ϵ' и $\text{tg}\delta$. В этой статье приведен способ нахождения ϵ' и $\text{tg}\delta$ волноводным методом [2].

Исследованию подвергался водный раствор наночастиц серебра, состоящий из AgNO_3 , водного раствора NH_3 и H_2O , водного раствора карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Измерения ϵ' и $\text{tg}\delta$ проводились на установке, блок схема которой приведена на рис. 1.

Если плечи С и D электрически симметричны (имеют одинаковую длину и нагружены одинаковыми сопротивлениями), то СВЧ-энергия, поступающая от СВЧ-генератора в плечо А, делится между плечами С и D поровну. При этом в плечо В энергия не поступает.

Если к одному из плеч С и D подключить нагрузку, принятую за эталонную (например К.З.), а к другому - исследуемую нагрузку (коротко замкнутую волноводную секцию с исследуемым диэлектриком), то та часть энергии, которая поступит в плечо В, и характеризует отличие исследуемой нагрузки от эталонной. Это свойство волноводного моста и используется для измерения ϵ' и $\text{tg}\delta$.

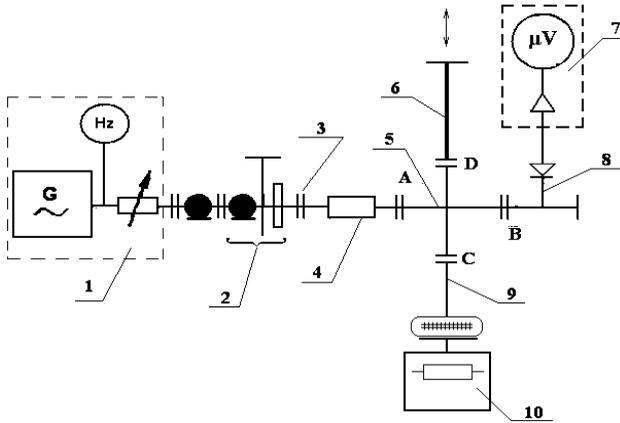


Рис.1. Блок-схема установки для измерения диэлектрических параметров с помощью волноводного моста: 1 – СВЧ генератор; 2 – волноводно-коаксиальный переход; 3 – соединение волноводов; 4 – аттенуатор; 5 – двойной волноводный тройник; 6 – подвижный реактивный короткозамыкатель; 7 – индикаторный прибор; 8 – детекторная головка; 9 – короткозамкнутая волноводная секция с исследуемым образцом; 10 – электронагреватель.

В отсутствие исследуемого образца диэлектрика в коротко замкнутой волноводной секции подбирают такое положение поршня подвижного короткозамыкателя в плече D, при котором наступает электродинамическая симметрия плеч C и D, т.е. добиваются минимального показания индикаторного прибора, величина которого зависит от потерь электромагнитной энергии в образце исследуемого диэлектрика.

Таким образом, показания индикаторного прибора и величина смещения поршня определяют искомые величины ϵ' и $\text{tg}\delta$.

ϵ' и $\text{tg}\delta$ определяются из соотношения:

$$\text{th}(\gamma d) / \gamma d = (-j\Lambda / 2\pi d) \times (K_a - j\text{tg}\Theta) / (1 - jK_a \text{tg}\Theta) \quad (1)$$

где $\gamma = (2\pi / \lambda) \cdot \sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' - (\lambda / 2a)^2}$; $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения электромагнитной волны в волноводе; α , β – коэффициент затухания и фазовая постоянная; λ – длина волны генератора СВЧ; a – ширина широкой стенки волновода; d – толщина исследуемого образца диэлектрика; $\lambda_A = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / 2a)^2}$ – длина волны в волноводе с воздушным заполнением; $K_a = \pi \Delta x / \Lambda$ – коэффициент бегущей волны, $\Delta x = x_2 - x_1$ – определяется по рис.3; $\Theta = (2\pi / \Lambda) \cdot X_m$ – фазовый угол; $X_m = (\Lambda / 2) - d - l$ – расстояние от поверхности образца до первого узла стоячей волны (рис. 2).

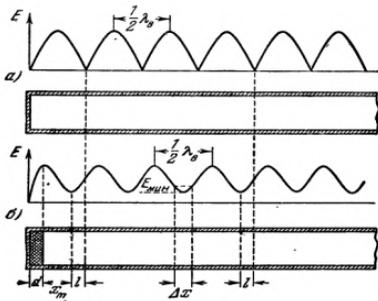


Рис. 2. Эпюр стоячей волны в волноводе: а) без образца; б) с образцом

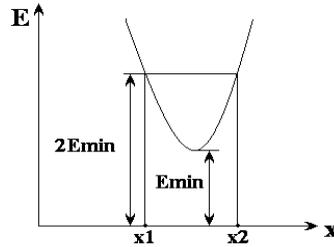


Рис. 3. График удвоенного минимума

Чтобы решить уравнение (1) относительно d , надо измерить K_6 и Θ . K_6 находится методом удвоенного минимума (рис. 3).

Измерение Θ сводится к измерению l с помощью микрометрического винта подвижного короткозамыкателя.

Трансцендентное уравнение (1) может быть решено строго при использовании двух образцов с кратными толщинами (d и $2d$). Этот метод особенно хорош тем, что исключает неоднозначность определения ϵ' и ϵ'' , связанную с периодичностью функций, входящих в (1).

Для образцов с толщинами d и $2d$ на основании (1) можно записать:

$$th(\gamma_1 d_1) / \gamma_1 d_1 = X_1 + jY_1, \quad th(\gamma_2 d_2) / \gamma_2 d_2 = X_2 + jY_2 \quad (2)$$

где X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 - экспериментально определяемые величины для образцов толщиной $d_1 = d$ и $d_2 = 2d$ соответственно. Используя формулу для тангенса двойного угла, при $d_2 = 2d_1$ можно получить:

$$\gamma_1 d_1 = \sqrt{((X_2 - X_1) + j(Y_2 - Y_1)) / ((X_1 - jY_1)^2 (X_2 + jY_2))} \quad (3)$$

откуда определяются комплексная постоянная распространения и значения ϵ' и ϵ'' .

Процесс измерения происходит поэтапно. На первом этапе в кювету помещают исследуемый диэлектрик. Вопросы подбора оптимальной толщины диэлектрика рассмотрены в [2]. На втором этапе кювету подсоединяют к измерительной линии и производят измерения, необходимые для определения K_6 и Θ по микрометрическому винту с точностью до $\pm 0,01$ мм. Добиваются, чтобы показания индикаторного прибора были минимальны, используя для этого находящиеся на нем регулировочные ручки усиления сигнала и чувствительности. На третьем этапе отсоединяют кювету и толщину диэлектрика увеличивают в два раза. После этого кювету подсоединяют обратно к измерительной линии и снимают зависимости, но уже для удвоенной толщины диэлектрика.

Данные измерений обрабатывались в программе, написанной на языке Visual Basic. Данной программой был реализован расчет ϵ' , ϵ'' и

$\text{tg}\delta$ по уравнениям (2) и (3) методом двух толщин с выводом результатов в виде таблицы в Microsoft Excel. Ниже представлены значения, полученные в ходе измерений.

Таблица 1. Диэлектрические параметры водного раствора наночастиц Ag

ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$
81.93	11.48	0.14

Полученные значения сопоставимы со значениями в работе [2], что говорит о правильности использованного метода измерения, и что эти параметры могут быть использованы для дальнейшего проектирования СВЧ камеры электротехнологической установки.

Литература

1. **Horikoshi S.**, Abe H., Torigoe K., Abe M., Serpone N. Access to small size distributions of nanoparticles by microwave-assisted synthesis. Formation of Ag nanoparticles in aqueous carboxymethylcellulose solutions in batch and continuous-flow reactors // *Nanoscale*. -2010. Vol 2. – P. 1441-1447.
2. **Брандт А.А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах/ А.А. Брандт. М.: Физматгиз, 1963. 403с.

УДК 621.316.9

А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент,
А.Ф. СОРОКИН, к.т.н., доцент,
М.Е. ТИХОВ, к.т.н., доцент,
В.Ф. ВОРОБЬЕВ, к.т.н., доцент,
С.В. ВОРОБЬЕВ, магистрант
(ИГЭУ) г. Иваново

Оценка влияния активного сопротивления грозозащитного троса на грозоупорность воздушных линий электропередачи

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 грозопорность ВЛЭП.

Методика расчета основывается на математической модели троса с распределенными параметрами, в которой принят ряд допущений:

1. трос однороден, и каждый его 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).

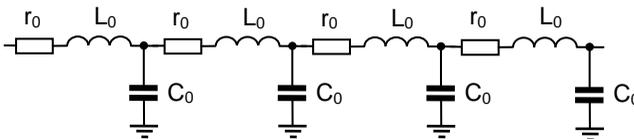


Рис. 1. Схема замещения грозотроса с распределенными параметрами

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:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \end{cases} \quad (1);$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (2).$$

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:

$$\frac{i_{x+1}^t - 2i_x^t + i_{x-1}^t}{h^2} = r_0 C_0 \frac{i_x^t - i_x^{t-1}}{\tau^2} + L_0 C_0 \frac{i_x^{t+1} - 2i_x^t + i_x^{t-1}}{\tau^2} \quad (5).$$

Разрешив это уравнение, относительно i_x^{t+1} , получим явную схему решения неоднородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$i_x^{t+1} = (2i_x^t + i_{x-1}^{t-1}) - \frac{r_0}{L_0} (i_x^t - i_x^{t-1})\tau + \frac{1}{L_0 C_0} \frac{(i_{x+1}^t - 2i_x^t + i_{x-1}^t)\tau^2}{h^2} \quad (6)$$

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).

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 (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).

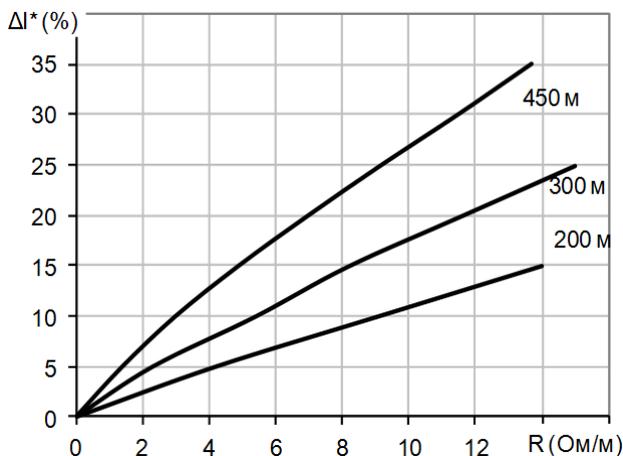


Рис. 2. Зависимость относительного снижения амплитуды тока молнии ($\Delta i^* = 1 - I_R/I$) на подходе к опоре от удельного активного сопротивления грозозащитного троса при различных длинах пролета ВЛЭП.

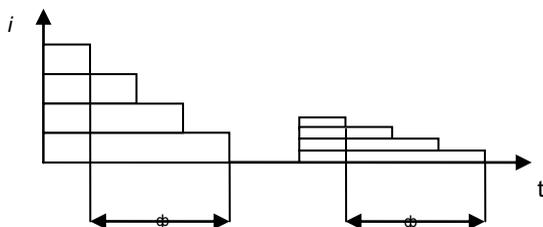


Рис. 3. Пояснения к процессу уменьшения крутизны волны тока

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 (рис. 3). Таким образом, при неизменной длине фронта снижение амплитуды тока волны приведет к снижению крутизны фронта 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:

$$n_r = n_{оп} + n_{тр} + n_{пр}, \quad (7)$$

где $n_{оп}$ - число отключений при ударе молнии в опору; $n_{тр}$ - число

отключений при ударе молнии в трос; $n_{пр}$ - 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 $R_{тр}=14$ (Ом/м), число отключений ВЛЭП при ударе молнии в середину пролета снижается на 50%.

Литература

1. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ-7).– 7-е изд. – М.: Юрайт, 2007. – 399 с., [2] л. карт.
2. **Дьяков А. Ф.**, Федосенко Р. Я. Об эффективности грозозащитных тросов ВЛ // 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.

УДК 621.316.9

С.Н. ГОРЯЧКИН, к.т.н., доцент,
 В.Ф. ВОРОБЬЕВ, к.т.н., доцент,
 М.Е. ТИХОВ, к.т.н., доцент,
 А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент,
 С.В. ВОРОБЬЕВ, магистрант.
 (ИГЭУ) г. Иваново

Исследование перенапряжений в сети с изолированной нейтралью при несимметричных режимах ее работы

В настоящее время общая протяженность кабельных линий электропередачи напряжением до 35 кВ включительно соизмерима с протяженностью воздушных линий тех же классов напряжения. Большинство линий выполнено в виде трех проводной конструкции, помещенной в общую оболочку. Характерной особенностью режимов работы подобных кабельных сетей является то, что в них практически отсутствуют длительные режимы работы с однофазным замыканием на землю, т.к. такие замыкания быстро переходят в междуфазные. Однако нормативные документы предписывают проектным и эксплуатационным организациям применять меры по компенсации емкостных токов при одно-

фазных замыканиях на землю в сетях напряжением до 35 кВ, включительно [1,2]. В этом случае причиной возникновения длительных (квазистационарных) перенапряжений могут быть неполнофазные режимы работы сети. Причинами возникновения неполнофазных режимов сети могут стать: обрыв фазы электропередачи; отказ в работе выключателя одной из фаз; неполнофазное срабатывание плавких предохранителей; нарушение контактных соединений в проводниках и др. Опасность этих процессов в сети обусловлена тем, что установленные в ней нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) не выдерживают таких перенапряжений, выходят из строя и это приводит к тяжелейшим авариям.

Исследование влияния несимметрии сети на напряжения в фазах и нейтрали электропередачи проводилось на математической модели, разработанной в среде Matlab/Simulink. Моделирование проводилось применительно к одной из подстанций 110 кВ ОАО «Ярэнерго», расположенной в г. Ярославль и питающей участок городской кабельной сети 10 кВ с емкостным током замыкания на землю 42,5 А. Для ограничения тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в нейтрали сети 10 кВ использовался дугогасительный реактор (ДГР). Степень настройки ДГР оценивалась коэффициентом q , равном отношению токов в нейтрали к емкостному току в сети. Несимметрия в модели сети создавалась путем отключения части емкости фазы А. Степень несимметрии сети оценивалась коэффициентом m , равным отношению емкости фазы А в неполнофазном режиме к емкости той же фазы в полнофазном режиме. Коэффициент m изменялся от 0,6 до 1,0. В процессе отладки работы модели установлено, что на уровне перенапряжений оказывает значительное влияние сопротивление заземления (R_3) подстанции, РП и ТП. Поэтому в модели предусматривалась возможность изменения R_3 в широких пределах. Замыкание фазы А на землю при моделировании переходного процесса осуществлялось в момент времени достижения максимального напряжения на фазе, а его отключение – при прохождении высокочастотной составляющей тока замыкания через нуль. Кратность перенапряжений, соответствующая реальным значениям в сети и равная $(2,2...2,4)U_{фм}$, наблюдалась при $R_3=4$ Ом. При $R_3=0$ перенапряжения были повышенными, а при $R_3=\infty$ - заниженными, приблизительно на 20%.

Влияние несимметрии сети на величину перенапряжений исследовалось при работе сети, как с изолированной нейтралью, так и с компенсацией емкостного тока при разной настройке реактора. На рис. 1 и рис. 2 приведены зависимости изменения коэффициентов перенапряжений на здоровых фазах ($K_{\phi}=U/U_{фм}$) и нейтрали ($K_N=U_N/U_{фм}$) от степени несимметрии сети (m) при разных настройках реактора (q).

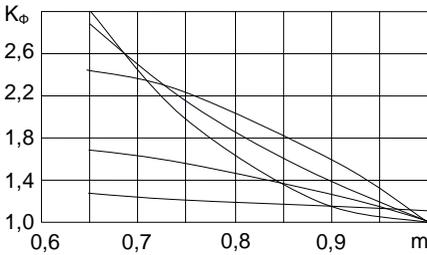


Рис. 1. Влияние несимметрии сети на кратности перенапряжений в фазах:
 1 – ф.А, нейтраль изолирована;
 2 – ф.С, ДГР с резонансной настройкой $q=1$; 3 – ф.С, ДГР с недокомпенсацией $q=0,9$; 4 – ф.С, ДГР с перекомпенсацией $q=1,1$; 5 – ф.А, ДГР с недокомпенсацией $q=0,9$

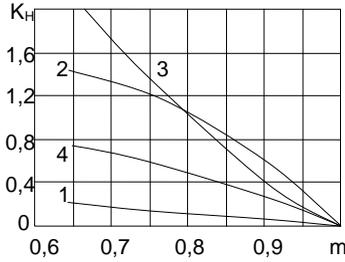


Рис. 2. Влияние несимметрии сети на смещение нейтрали:
 1 – нейтраль изолирована;
 2 – ДГР с резонансной настройкой $q=1$;
 3 – ДГР с недокомпенсацией $q=0,9$;
 4 – ДГР с перекомпенсацией $q=1,1$

Появление несимметрии (невключение фазы выключателя на подстанции, $m=0,65$) при работе сети с изолированной нейтралью приводит к сравнительно небольшому повышению напряжения ($1,14U_{фm}$) на одной из включенных фаз (фаза А, рис.1) и на нейтрали ($0,15U_{фm}$, рис.2). Однако, эта же несимметрия в компенсированной сети может привести к значительным перенапряжениям на изоляции оборудования питающей подстанции (с кратностью более $3U_{фm}$ на фазе С и более $2U_{ф}$ на нейтрали, см. рис.1, 2). Причем кратность перенапряжений зависит от настройки ДГР. Наибольшие значения наблюдаются при недокомпенсации или резонансе и наименьшие при перекомпенсации.

Как показали исследования, снизить уровень квазистационарных перенапряжений, вызванных несимметрией сети, можно путем подключения параллельно к ДГР активного сопротивления.

На рис. 3. приведены зависимости кратностей перенапряжений (K_{ϕ}) на фазе С от величины активного сопротивления при разных настройках ДГР.

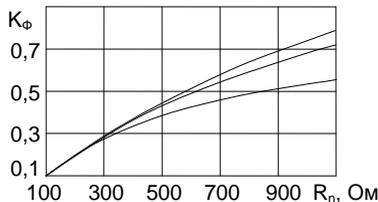


Рис. 3. Кратность перенапряжений на фазе С при $m=0,65$ и ДГР с параллельно включенным резистором в нейтрали: 1 – $q=1$; 2 – $q=0,9$; 3 – $q=1,1$

В диапазоне значений сопротивления от 100 до 300 Ом настройка ДГР практически не влияет на повышение напряжений на фазах и нейтрали, а при значении $R_n=150$ Ом повышение напряжения на фазах и нейтрали при $m=0,65$ такое же, как и в режиме работы сети с изолированной нейтралью.

Анализ токов, протекающих через резистор в различных режимах и мощностей, выделяющихся в нем, показал, что для надежного ограничения перенапряжений в сети величину R_n можно принять в диапазоне 100-200 Ом. При этом токи протекающие через резистор не будут превышать 6 А, а мощность будет находится в диапазоне 4-7 кВт.

Выводы

1. При однофазных замыканиях на землю максимальные перенапряжения могут возникать в точках сети, удаленных от места замыкания.
2. Возникновение однофазной несимметрии в компенсированной сети может привести к опасным перенапряжениям, и прежде всего, для изоляции нейтрали трансформаторов и ОПН.
3. Для снижения уровня перенапряжений до безопасных значений возможно с помощью шунтирования ДГР активным сопротивлением, величиной 100–200 Ом.

Литература

1. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ-7).–7-е изд. – М.: Юрайт, 2007. – 399 с., [2] л. карт.
2. **РД 34.20.179** (ТИ 34-70-070-87). Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ.

УДК 621.314.21: 621.3.048

О.С. МЕЛЬНИКОВА, аспирант,
Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор
(ИГЭУ), г. Иваново

Оценка роли механических частиц при пробое трансформаторного масла в испытательной ячейке

В эксплуатации содержание механических частиц в трансформаторном масле со временем возрастает, что приводит к снижению его пробивного напряжения, причём особенно резкое снижение наблюдается при наличии в масле увлажнённых волокон [1]. Поэтому важно контролировать изменение электрической прочности масла. Характеристики его электрической прочности при этом определяют в стандартном маслопробойнике по шести пробоям (ГОСТ 6581-75). По результатам испытаний для одной пробы масла определяются среднее арифмети-

ческое значение пробивного напряжения и среднее квадратическое отклонение пробивного напряжения, которые затем сопоставляются с нормативными параметрами с учётом категории электрооборудования [2]. Для каждой категории электрооборудования предусмотрены также соответствующие классы чистоты трансформаторного масла [2], для которых в соответствии с ГОСТ 17216-71 устанавливается распределение частиц по размерам в единице объёма масла.

Кроме того, электрическая прочность масла снижается при увеличении его объёма между электродами [1]. Эта зависимость объясняется статистической природой формирования пробоя в жидкости, в соответствии с которой электроизоляционные свойства масла определяются наименее прочным элементарным объёмом. Вероятность наличия такого элементарного объёма возрастает с увеличением общего объёма, а средняя прочность образца масла падает с увеличением его размеров. Это положение следует учитывать при анализе методики испытаний масла на пробой в стандартном маслопробойнике, который имеет испытательную ячейку с объёмом масла 0,4 л., а объём масла между электродами на два порядка меньше объёма ячейки.

С учётом этого важно выяснить особенности изменения распределения частиц по размерам в зависимости от исследуемого объёма в испытательной ячейке.

Для этого проведён расчёт числа частиц заданного размера в исследуемых объёмах масла при испытании его в стандартном маслопробойнике применительно к эксплуатационному маслу различных категорий электрооборудования. Число частиц в объёме масла определялось по формуле:

$$N_{\text{ч}} = n_0 V_{\text{м}}, \quad (1)$$

где n_0 – число частиц заданного размера в единице объёма (счётная концентрация); $V_{\text{м}}$ – исследуемый объём масла.

Результаты расчёта представлены в таблице 1. Из анализа полученных данных следует, что в объёме масла, находящемся в зазоре между электродами испытательной ячейки, нет частиц в виде волокон, хотя в самой ячейке находится 80 и 160 волокон соответственно для классов чистоты эксплуатационного масла 12 и 13.

Из (1) можно получить выражение для определения необходимого граничного объёма масла между электродами, при котором в нём будет хотя бы одна частица, то есть

$$V_{\text{м,г}} = 1/n_{0,\text{в}}, \quad (2)$$

где $n_{0,\text{в}}$ – штучная концентрация волокон в масле.

Тогда в соответствии с (2) граничные объёмы масла для классов чистоты (12) и (13) соответственно равны $5 \cdot 10^{-6}$ и $25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$. В обоих случаях эти объёмы масла больше соответствующего объёма между электродами испытательной ячейки, равного $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Следовательно, существующая методика определения пробивного напряжения в стандартном маслопробойнике приводит к тому, что влияние волокон (особенно увлажнённых) на пробивное напряжение масла отражается не в полной мере.

Таблица 1. Содержание механических частиц примесей в заданном объёме трансформаторного масла, шт

Категория оборудования	Класс чистоты масла по ГОСТ 17216-71	Объём масла	Число частиц в объёме масла при заданном диапазоне их размеров, мкм					волокон
			св. 5 до 10	св. 10 до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 200	
Электрооборудование до 220 кВ включительно	13	1 м ³	не нормируется	63·10 ⁷	63·10 ⁶	8·10 ⁶	2·10 ⁶	4·10 ⁵
		4·10 ⁻⁴ м ³ (объём масла в испытательной ячейке маслопробойника)	не нормируется	252·10 ³	252·10 ²	32·10 ²	800	160
		2·10 ⁻⁶ м ³ (объём масла в зазоре между электродами испытательной ячейки)	не нормируется	1260	126	16	4	нет
Электрооборудование свыше 220 кВ до 750 кВ включительно	12	1 м ³	63·10 ⁷	315·10 ⁶	315·10 ⁵	4·10 ⁶	10 ⁶	2·10 ⁵
		4·10 ⁻⁴ м ³	252·10 ³	126·10 ³	126·10 ²	16·10 ²	400	80
		2·10 ⁻⁶ м ³	1260	630	63	8	2	нет

С другой стороны, как отмечалось выше, содержание волокон в объёме испытательной ячейки достаточно велико, поэтому необходимо обеспечить их участие в формировании пробы масла между электродами. Это можно осуществить непрерывным перемешиванием масла в ячейке при плавном подъёме напряжения, приложенного к электродам, до момента пробоя масла. Такие действия в регламенте испытаний по ГОСТ 6581-75 не предусмотрены. Вместе с тем по стандарту ASTM D1816-67 (1971, США) проводится непрерывное перемешивание масла в ячейке в течение всего времени поднятия напряжения до его пробоя. Однако при этом перемешивание осуществляется в нижней части ячейки, что мало влияет на смену масла между электродами.

Таким образом, в дальнейшем важно с учётом полученных результатов усовершенствовать методику определения пробивного напряжения в маслопробойнике.

Литература

1 Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для вузов/ И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

2 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.

УДК 621.314.21: 621.3.048

О.С. МЕЛЬНИКОВА, аспирант,
Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

Поведение частиц, образующихся при пробое трансформаторного масла в ячейке маслопробойника

При испытаниях в типовой ячейке проводится 6 пробоев масла. По результатам этих испытаний в соответствии с ГОСТ 6581-75 определяется среднее пробивное напряжение и среднеквадратичное отклонение, которые сопоставляются с нормативными данными, установленными для каждой категории электрооборудования. В связи с этим важно принять меры к более точному определению пробивного напряжения.

В существующих методиках после каждого пробоя предусматривается перемешивание масла в сосуде. Однако имеются отличия в значениях времён выдержки после пробоев и длительности перемешивания масла в стандартах различных стран.

Для проведения более обоснованного анализа особенностей выбора этих времён важно изучить поведение частиц, образующихся при пробое масла.

С учётом этого далее рассматривается модель электродной системы маслопробойника (рис.). Пробой масла происходит в центральной части электродов и сопровождается образованием пузырьков газа и науглероженных частиц.

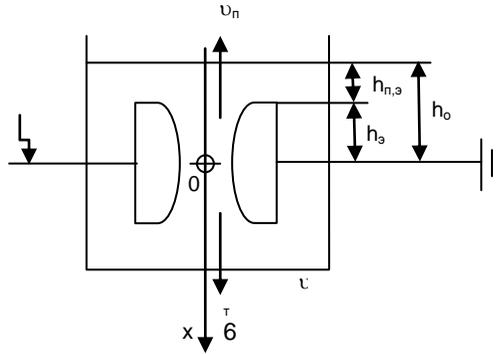


Рис. Модель электродной системы маслопробойника

После пробоя масла на пузырьки газа и твёрдые частицы действуют силы тяжести F_T , Архимеда F_a и сопротивления масла движению этих частиц F_C . Тогда дифференциальное уравнение, описывающее движение этих частиц в общем виде запишется так:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_m + \vec{F}_a + \vec{F}_c, \quad (1)$$

где m – масса дисперсной частицы, \vec{v} – скорость движения частицы.

С учётом выражений для действующих сил уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\rho_{\text{ч}}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}}) - \frac{9\eta v}{2R_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{м}}$ – плотность соответственно материала частицы и масла; $R_{\text{ч}}$ – радиус частицы; η – динамическая вязкость жидкости.

Граничные условия:

$$t=0, v=0; \quad t \rightarrow \infty, v=v_c, \quad (3)$$

где v_c – скорость движения частицы в стационарном режиме.

Решение уравнения (2) при граничных условиях (3) даёт:

$$v = v_c (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4)$$

где τ – постоянная времени

$$\tau = \frac{2R_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}{9\eta}, \quad (5)$$

$$v_c = \frac{2R_q^2 g(\rho_q - \rho_M)}{9\eta}. \quad (6)$$

Проведена оценка постоянной времени τ для характерных исходных данных: для масла – $\eta = 0,021$ Па·с, $\rho_M = 890$ кг/м³; для газа – $\rho_g = 1,293$ кг/м³; для твёрдых частиц – $\rho_q = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; радиусы газовых пузырьков и твёрдых частиц составляют $5 \cdot 10^{-5}$ м. Расчёты по (5) показали, что постоянная времени τ для пузырьков газа и твёрдых частиц соответственно равны $0,34 \cdot 10^{-7}$ с и $0,5 \cdot 10^{-4}$ с. Следовательно, переходный процесс занимает незначительное время и процесс движения пузырьков газа и твёрдых частиц можно считать стационарным.

Тогда для стационарного режима пройденный частицей путь за время t найдётся так:

$$x = v_c t = \frac{2R_q^2 g(\rho_q - \rho_M) t}{9\eta}. \quad (7)$$

Применительно к маслоробойнику важно оценить время удаления пузырьков газа из области пробова масла до поверхности раздела масло-воздух, а также установить факт возможного оседания твёрдых частиц за пределы электродного пространства за время паузы в перемешивании масла после его пробова.

Время прохождения частиц примесей заданной высоты h найдётся из (7):

$$t_h = \frac{9\eta h}{2R_q^2 g(\rho_q - \rho_M)}. \quad (8)$$

Результаты расчёта по (8) времён удаления пузырьков газа из места пробова масла ($h = h_0 = 58$ мм – по ГОСТ 6581-75) и оседания твёрдых частиц ($h = h_0 = 18$ мм – по ГОСТ 6581-75) при различных их радиусах представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Изменение времени удаления пузырьков газа из места пробова масла в зависимости от их радиуса

Радиус пузырька газа, м	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Время удаления пузырька $t_{h,0}$, с	6200	248	62	2,48	0,62

Таблица 2. Изменение времени оседания твёрдых частиц из места пробова масла в зависимости от их радиуса

Радиус твёрдой частицы, м	$4 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-5}$
Время оседания частицы $t_{h,0}$, с	10^4	$4 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	380

Из табл. 1 следует, что пузырьки газа с радиусом более 50 мкм удаляются из масла за время выдержки 5 минут (ГОСТ 6581-7500) между пробоями. Твёрдые науглероженные частицы (табл. 2) за 5 минут покидают межэлектродный промежуток при значениях их радиусов более 20 мкм.

Полученные результаты могут быть применены при разработке рационального регламента испытания масла в маслопробойнике.

УДК 621.314.21: 621.3.048

О.С. МЕЛЬНИКОВА, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Анализ эффективности традиционных методик определения пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике

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: подготовку 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.

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
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	+	+	+	+

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	
Перемешивание масла перед испытанием	+	+	+	+
Температура пробы жидкости при испытании	15-35°C	не ниже 20°C	комнатная температура	20±5°C
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	$\sigma < 20\%$	$3(U_{np,max} - U_{np,min}) < U_{np,min}$	-	-
Протокол испытания	+	+	+	+

Приведенные методики определения пробивного напряжения имеют существенные различия. Принципиальные различия заключаются в конструкции испытательной ячейки. В Стандарте США указывается объем 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.

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.

УДК 621.314.21: 621.3.048

Э.Л. НАЧАТОЙ, аспирант,
Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

Экспериментальная установка для исследования абсорбционных характеристик трансформаторного масла

Высоковольтные силовые трансформаторы, являются важнейшими узловыми элементами любой электрической сети, которые отличаются не только высокой стоимостью самого оборудования, но и дороговизной ремонтно-восстановительных работ, сравнимых иногда со стоимостью нового трансформатора. Кроме того, выход из строя силового трансформатора часто приводит к длительному перерыву в электроснабжении потребителей, что совершенно неприемлемо, особенно в промышленных районах. Таким образом, возникает важная проблема своевременной и объективной диагностики состояния силовых трансформаторов с целью разработки и проведения предупредительных ремонтных работ. Отметим, что большая часть аварий на трансформаторном оборудовании, связана с нарушениями в работе изоляции данных аппаратов. Поэтому важно создать эффективные методы диагностики изоляции силовых трансформаторов.

Важнейшей диагностической средой для маслонаполненного высоковольтного электроэнергетического оборудования является трансформаторное масло. Применительно к силовым трансформаторам предусмотрены десятки параметров, по которым контролируется состояние данного жидкого диэлектрика. При этом в настоящее время отсутствуют методы контроля количества мелких коллоидных частиц примесей в трансформаторном масле. Такие частицы образуются в процессе старения масла и во многом определяют электроизоляционные характеристики внутренней изоляции трансформатора. Данное явление обусловлено тем, что при

оседании частиц на поверхность твердой изоляции создаются условия возникновения частичных разрядов, которые с течением времени развиваются в скользящий разряд и приводят к повреждению трансформатора.

Следует учесть, что частицы примеси участвуют в формировании электрического тока в жидком диэлектрике, а их концентрация и физические свойства оказывают влияние на вид зависимости электрического тока от времени [1]. Таким образом, важно установить влияние частиц примеси на ампер-секундные характеристики масла при воздействии импульсов напряжения разной формы и длительности.

С учетом этого была создана экспериментальная установка, позволяющая создавать различные виды электрических, температурных и вибрационных воздействий на трансформаторное масло.

На рис. 1 представлена электрическая схема созданной экспериментальной установки. Она запитана от регулируемого блока питания (РБП), способного выдавать постоянное стабилизированное напряжение до 1000 В. Напряжение с РБП подается на блок формирования импульсов (БФИ), который создает на своем выходе прямоугольные импульсы напряжения длительностью до десятков минут и амплитудой до 500 В. Кроме того, БФИ способен производить смену полярности импульса во время испытания (рис. 2). Время переключения БФИ, а, следовательно, время нарастания и спада (смены полярности) импульсов, составляет порядка 10 мкс, что обеспечивается применением высоковольтных тиристорных ключей. Отметим, что применение полупроводниковых коммутационных аппаратов в схеме исключает дребезг и искрообразование при переключениях и позволяет исследовать незашумленный переходный процесс.

Напряжение с БФИ подается на испытательный модуль (ИМ), в состав которого входит испытательная ячейка (ИЯ) и цепи измерения (рис. 1). Испытательная ячейка представляет собой систему из двух плоских электродов, пространство между которыми, заполнено исследуемым трансформаторным маслом. К измерительным цепям относятся делитель напряжения R_1 , R_2 и токоизмерительное сопротивление $R_{ш}$. Измеряемыми величинами являются напряжения U_A и U_B . Эти напряжения фиксируются программно-аппаратным комплексом, состоящим из персонального компьютера (ПК), снабженного платой сбора данных (ПСД) и специально разработанным программным обеспечением (ПО). Программно-аппаратный комплекс позволяет вести запись указанных величин в зависимости от времени в цифровом формате. Предусмотрена запись с переменной частотой дискретизации (от 30 мкс до 1 с) для возможности анализа как быстротекущего переходного процесса в момент переключения, так и медленных процессов в диапазоне десятков минут.

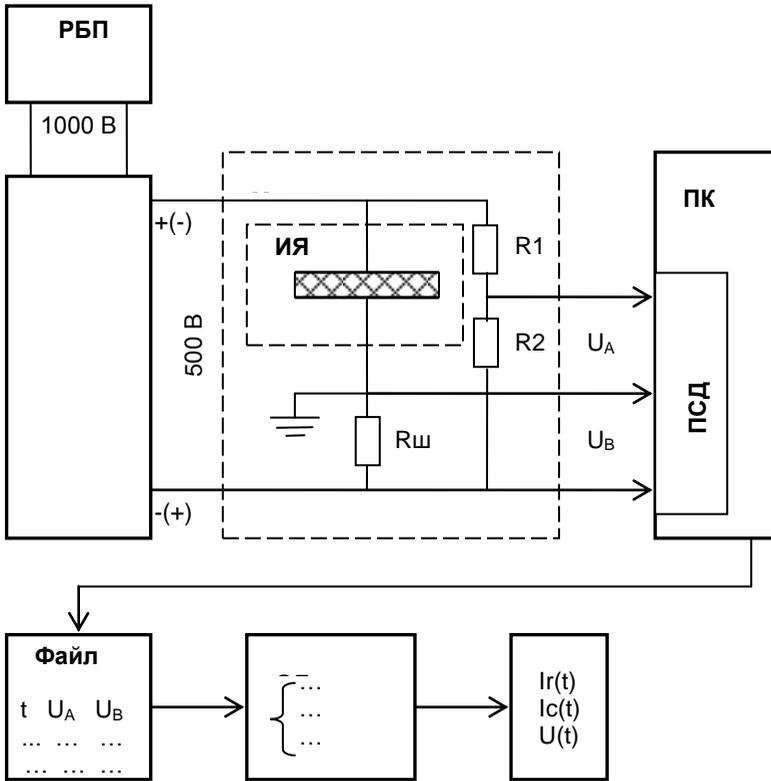


Рис. 1.

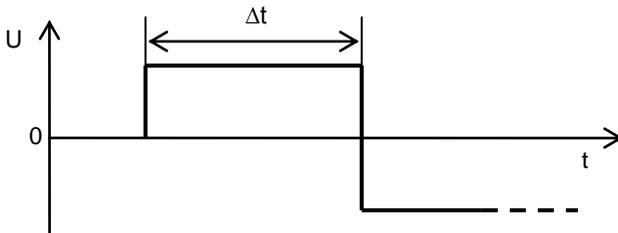


Рис. 2

Полученные зависимости $U_A(t)$ и $U_B(t)$ сохраняются в файл для дальнейшего анализа в блоке обработки данных (БОД). БОД представляет собой ПК со специальным математическим ПО, которое произво-

дит решение системы электротехнических уравнений, описывающих схему экспериментальной установки и схему замещения исследуемого образца. Система уравнений учитывает емкость испытательной ячейки и паразитные емкости измерительных цепей, что позволяет с достаточной точностью получить временные зависимости тока через образец (полного, активного, реактивного), а также напряжения на испытательной ячейке.

Таким образом, созданная установка позволяет проводить серии экспериментов по исследованию поведения ампер-секундных характеристик трансформаторного масла как в процессе формирования, так и в течение всего импульса воздействующего напряжения, при различных его длительностях Δt (рис. 2), температурах и уровнях вибрации.

Литература

1. Скани Г. И., Физика диэлектриков (область слабых полей), М. — Л., 1949.

УДК 621.315.2.016.2; 621.3:37.016

А.В. ВИХАРЕВ, к.т.н., доцент,
В.Ф. ВОРОБЬЕВ, к.т.н., зав. кафедрой,
С.А. КОНСТАНТИНОВА, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

Научно-исследовательская электротехническая лаборатория «Полигон для диагностики изоляции высоковольтных силовых кабелей»

Одним из основных направлений решения вопросов, связанных с эксплуатацией стареющего электроэнергетического оборудования является внедрение новых методов диагностики изоляции. 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 корпус, 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». При создании Полигона планируется решение следующих задач:

- 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.

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 маслобарьерная 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, пробегающий 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.

При выполнении научно-исследовательских работ на базе кабельного Полигона планируется получить следующие результаты:

1. Методики проведения новых испытаний. Разработка и утверждение нормативной документации (ТУ, РД) проведения испытаний электроэнергетического оборудования;

2. Создание и сертификация новой приборной базы для реализации разработанных методик проведения испытаний (ОКР);

3. Подготовка и защита докторской диссертации, а также не менее 3 кандидатских диссертаций;

4. Выполнение исследований в рамках подготовки выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров;

5. Участие в конференциях по кабельной технике, в том числе и зарубежных. Публикации в центральных научных журналах;

6. Монография по современным методам испытания высоковольтных кабелей.

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 электро-физических процессов в изоляции кабелей, методов их диагностики, нормируемых показателей, а также типовых электротехнических лабораторий (подстанционные, кабельные, комбинированные).

УДК 621.315.2.016.2; 621.3:37.016

А.В. ВИХАРЕВ, к.т.н., доцент,
М.В. ПРУСАКОВ, к.т.н., ст. преподаватель,
Г.В. БЕЛЯЕВ, ст. преподаватель
(ИГЭУ) г. Иваново

Создание научно-исследовательской электротехнической 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. Обучение персонала современным методам диагностики изоляции высоковольтных силовых кабелей, способам восстановления поврежденных участков кабельных линий электропередачи, позволит снизить аварийность на сетевых предприятиях энергетического комплекса. В образовательных программах по направлению «Электроэнергетика и электротехника» заложено изучение проблем, связанных с изоляцией кабелей.

На кафедре «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» планируется создание специализированной электротехнической лаборатории «Полигон для диагностики изоляции высоковольтных силовых кабелей». Кроме помещения со специализированным испытательным оборудованием в состав лаборатории будет входить кабельная трасса с заглубленными в грунт кабелями (рис.)

На 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.

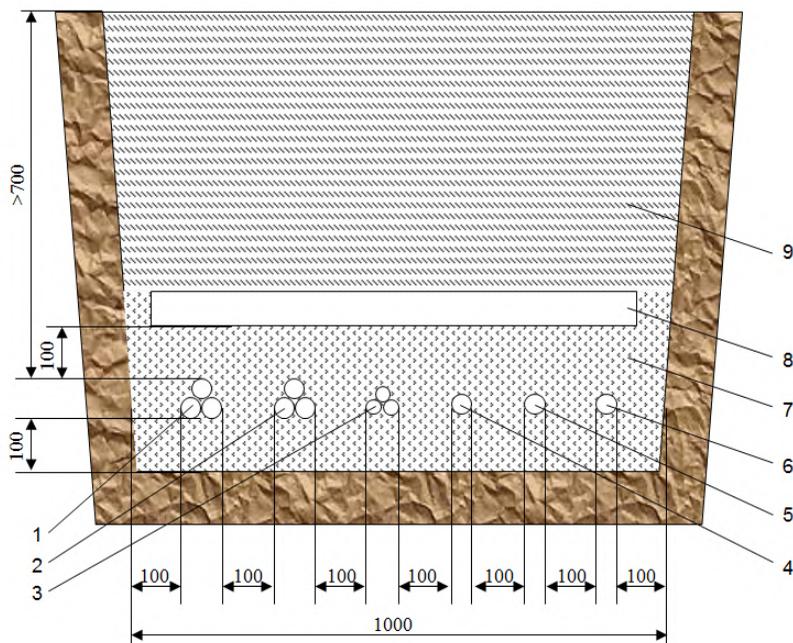


Рис. Прокладка кабеля в траншее

- 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.

Предлагается разместить на трассе кабели с бумажно-масляной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена. 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. 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 50100 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 таблице.

Таблица. 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 оборудованной ЛК 10+ (например, использование рефлектомера «Рейс-305»).

УДК 621.315:2

С.А. СЛОВЕСНЫЙ к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Оценка состояния изоляции кабельных линий электропередачи

В современных условиях, когда значительная часть основного силового оборудования выработало свой ресурс, а средства на его замену отсутствуют, возрастает актуальность способов контроля и оценки технического состояния электрооборудования, позволяющих максимально обоснованно принимать решение о возможности дальнейшей эксплуатации подобных технических средств.

Вышесказанное в первую очередь относится к силовым кабельным линиям 6-110 кВ, количество которых в распределительных сетях исчисляется десятками тысяч.

При эксплуатации силовые КЛ подвергаются комплексному воздействию электрического поля, вызывающему электрическое старение изоляции, тепловому воздействию, приводящему к тепловому старению и окислению изоляции, происходит увлажнение и химическое старение изоляции, сопровождающееся ухудшением электрофизических характеристик изоляции. Старение изоляции силовых кабелей в результате длительного воздействия эксплуатационных факторов является основ-

ной причиной пробоя кабелей при достижении предельных значений характеристик изоляции.

Для предупреждения аварий на КЛ и разработки плана по замене выработавших ресурс силовых кабелей необходима информация о текущем состоянии изоляции кабелей. Для получения подобной информации проводятся приемо-сдаточные испытания непосредственно после монтажа кабельных линий и периодические планово-профилактические испытания в процессе их эксплуатации. В России наиболее достоверным видом испытания, содержащим информацию о состоянии изоляции кабелей, считается испытание повышенным выпрямленным напряжением, призванное выявлять участки с ослабленной изоляцией, в которых в момент приложения испытательного напряжения, происходит пробой изоляции.

Эти испытания позволяют определять только сильно развитые дефекты и повреждения. Зарождающиеся дефекты в КЛ на ранних стадиях их развития при подобных испытаниях не выявляются.

Кроме того, испытания воздействием повышенного выпрямленного напряжения сами по себе приводят к ухудшению состояния изоляции и появлению новых слабых мест в изоляции кабеля, т.к. испытательное напряжение многократно превышает номинальное напряжение КЛ. Так, например, известны случаи, когда кабели, успешно выдержавшие испытания повышенным выпрямленным напряжением, выходят из строя в ближайшие дни и недели после проведения испытаний.

При испытании кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при приложении постоянного напряжения происходит накопление объемных зарядов в микронеоднородностях и включениях изоляции, что приводит к снижению электрической прочности и последующему пробою изоляции. Таким образом, испытания повышенным выпрямленным напряжением силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые находят все более широкое применение в России, не только не эффективны, но и оказывают негативное воздействие на их изоляцию.

Для силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, гораздо более эффективным и экономичным является щадящий метод испытания напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ).

Метод испытаний напряжением сверхнизкой частоты основан на применении пониженного уровня испытательного напряжения частоты 0,1 Гц косинусоидально-прямоугольной формы. При такой форме напряжения частоты 0,1 Гц процесс смены полярности происходит так же, как и при напряжении синусоидальной формы промышленной частоты 50 Гц. То есть, кабель нагружается и испытывается подобно тестированию при промышленной частоте 50 Гц

Кроме того, испытания при очень низких частотах со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования остаточных объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции, в отличие от того, как это происходит при приложении постоянного

напряжения. Испытания напряжением сверхнизкой частоты не влияют на общее состояние материала изоляции. Поэтому, за рубежом кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена испытываются исключительно напряжением сверхнизкой частоты.

Большая, по сравнению с испытанием повышенным выпрямленным напряжением, эффективность испытания напряжением сверхнизкой частоты обусловлена тем, что способ приложения испытательного напряжения и его уровень приводят к пробое лишь при наличии больших дефектов в изоляции КЛ и не допускают развития поврежденных в более мелких дефектах изоляции КЛ.

При проведении испытаний напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц величина испытательного напряжения не превышает $3U_{ном}$ при вводе КЛ в эксплуатацию и $1,73U_{ном}$ в процессе эксплуатации. Регламентируемая длительность испытаний одной фазы КЛ составляет 15 мин при вводе КЛ в эксплуатацию и 30 мин в процессе эксплуатации. По мере накопления опыта испытаний параметры режимов испытаний силовых КЛ могут уточняться, что дополнительно позволит повысить эффективность испытаний напряжением СНЧ 0,1 Гц.

Не смотря на уменьшенный уровень воздействующего напряжения при испытаниях напряжением СНЧ, испытание остается разрушающим, при этом стоимость ремонта одной кабельной линии 6-10кВ составляет примерно 250 тысяч рублей, а линии 35кВ – 300 тысяч рублей [1].

Для повышения надежности электроснабжения потребителей и снижения затрат на обслуживание КЛ, необоснованно выводимых в ремонт при профилактических испытаниях повышенным выпрямленным напряжением, более предпочтительным является применение неразрушающих методов испытаний и диагностики силовых КЛ. Неразрушающие методы испытания, основанные на периодическом измерении наиболее информативных характеристик изоляции, позволяют не только получать информацию о текущем состоянии изоляции кабелей, не вызывая ее ускоренного старения, но и являются источником информации для прогнозирования остаточного срока службы длительно эксплуатирующихся кабелей. На основе этой информации может быть скорректирован план профилактических испытаний КЛ и выработана стратегия по замене кабелей с опасными дефектами или с выработанным ресурсом изоляции.

К числу неразрушающих методов испытаний изоляции силовых КЛ относится метод, базирующийся на измерении характеристик частичных разрядов (ЧР).

В кабелях с бумажно-пропитанной изоляцией ЧР возникают в воздушных включениях, образующихся в изоляции вследствие многократных циклов нагрева и охлаждения кабелей и поперечного перемещения пропиточного состава. При длительном воздействии ЧР приводят к пробое изоляции. В кабелях с пластмассовой изоляцией при

длительном приложении напряжения ЧР являются причинами зарождения ветвистых побегов – электрических триингов, приводящих к пробое изоляции [2].

Одним из наиболее перспективных, на настоящее время, методов оценки состояния изоляции КЛ по характеристикам ЧР является метод регистрации ЧР, вызываемых воздействием затухающего осциллирующего напряжения, с использованием диагностической системы OWTS (Oscillating Wave Test System). Использование в качестве испытательного воздействия затухающих импульсов напряжения дает возможность определять напряжение возникновения и погасания ЧР, а также их интенсивность. В то же время электрические сигналы, регистрируемые системой OWTS, не позволяют определять место нахождения ослабленных участков кабельной изоляции.

Выполненный анализ методов оценки состояния изоляции кабельных линий электропередачи свидетельствует об актуальности совершенствования существующих неразрушающих методов испытания КЛ и, в первую очередь, методов, базирующихся на измерении характеристик ЧР, возникающих на участках кабелей в местах развивающихся дефектов в изоляции.

Литература

1. <http://www.energo-info.ru/content/view/20506/225>. Неразрушающие методы на вооружении профессионалов.
2. **Привалов И.Н.**, Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно Учебное пособие –Санкт-Петербург, 2008 г.

УДК 621.315

Т.Е. ШАДРИКОВ, магистрант,
В.Ф. ВОРОБЬЕВ, к.т.н., зав. кафедрой
(ИГЭУ), г. Иваново

Особенности испытаний кабельных линий с различной изоляцией

В настоящее время нормальная работа систем электроснабжения промышленных предприятий, сельского и коммунального хозяйств, а так же бытовых потребителей невозможна без надежной работы силовых кабелей среднего и низшего напряжения. В России силовые кабели на номинальное напряжение до 35 кВ включительно выпускаются с пропитанной бумажно-масляной изоляцией [1], пластмассовой изоляцией [2] и резиновой изоляцией [3]. Однако наиболее удобными и перспективными в эксплуатации являются кабели с экструдированной пластмассовой изоляцией. При этом наибольшее распространение

получили силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабели, XLPE-кабели). Ряд кабельных заводов России освоил производство этих кабелей [4] с использованием современных технологий. Выпускаемые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена соответствуют международному стандарту [5]. Однако, в настоящий момент единый стандарт для испытаний СПЭ-кабелей в РФ отсутствует.

Силовые кабельные линии на номинальное напряжение до 35 кВ включительно подвергаются испытаниям по контролю состояния в соответствии с действующими в России нормативными документами [6,7,8]. Для предупреждения аварий на КЛ и разработки стратегии по замене силовых кабелей с опасными дефектами или с выработанным ресурсом изоляции необходимо иметь достоверную информацию о текущем состоянии изоляции кабелей. Для оценки состояния изоляции силовых кабелей в условиях эксплуатации применяются различные методы испытаний и диагностики [6], в том числе традиционно используемые и новые современные методы. Основным недостатком испытания выпрямленным напряжением является неравномерное распределение напряжения по толщине изоляции в зависимости от проводимости ее отдельных частей. Помимо поиска слабых мест в изоляции, данные испытания 4-6 кратным повышенным, по отношению к номинальному, напряжением могут ухудшить состояние остальных участков изоляции и муфт кабельной системы. Такие испытания предназначены в первую очередь для поиска мест сильно развитых дефектов на поздних стадиях их развития (механические повреждения, влага), и слабо обнаруживают начальные дефекты, проявляющиеся из-за воздействия эксплуатационных факторов. И наконец, данный вид испытаний не эффективен и губителен при испытании СПЭ-кабелей, набирающих популярность в России. Технология изготовления сшитого полиэтилена сложна и высокотехнологична, однако не идеальна и присутствие микронеоднородностей и твердых включений все же встречается в готовых образцах. Во включениях и неоднородностях при испытаниях выпрямленным напряжением происходит накопление объемного заряда, что, в конечном счете, приводит к снижению электрической прочности, появлению частичных разрядов (ЧР) и пробоя изоляции. Применительно к силовым кабелям с пластмассовой изоляцией и, в первую очередь, к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена, гораздо более эффективным и экономичным является щадящий метод испытания напряжением промышленной частоты и напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ).

Метод испытания напряжением промышленной частоты основан на применении щадящего уровня испытательного напряжения синусоидальной формы. Смена полярности осуществляется по синусоидальному закону с частотой 50 Гц. Таким образом, кабель с СПЭ-изоляцией испытывается повышенным в 2-3 раза напряжением сети с частотой 50 Гц, вместо 4-6 кратного приложения постоянного напряжения. Такой способ приложения испытательного напряжения приводит к гарантированному

пробую лишь при наличии значительных дефектов в изоляции (вследствие высокой скорости увеличения канала пробоя) и не допускает развития повреждений в более мелких дефектах изоляции КЛ при их испытаниях. В то же время КЛ, работающие под напряжением промышленной частоты, стоит испытывать именно напряжением промышленной частоты. Проблема создания компактного испытательного источника повышенного напряжения промышленной частоты актуальна в настоящее время и блок – схема проектируемого источника представлена на рис. 1

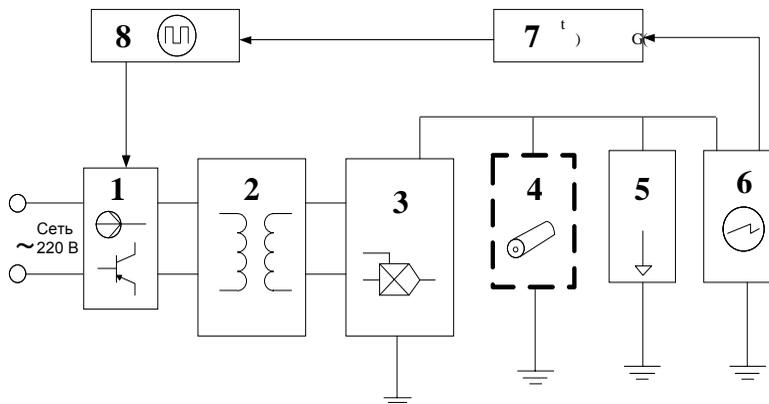


Рис. 1. Блок схемы испытательной установки. 1- преобразователь напряжения, 2 – высокочастотный трансформатор, 3 - умножитель напряжения, 4 – объект испытания, 5 – устройство разрядки, 6 – блок измерений, 7 – блок обратной связи, 8 – задающий генератор

Создание такого источника 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 [9] для полевых портативных испытаний, произведенные в Германии (Seba KMT) и США (HV Inc.) и др. В представленной схеме на рис.1 на объекте испытания формируется заданное оператором напряжение – либо постоянное, либо с частотами от сверхнизких до промышленных. 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.

Для повышения надежности энергоснабжения потребителей в сетях до 35 кВ, следует совершить ряд радикальных мер в области эксплуатации кабельных линий. Необходим переход от планово-предупредительных работ к комплексной диагностике текущего состояния оборудования, что в полной мере позволит контролировать уровень текущего износа оборудо-

вания и вовремя прогнозировать обслуживание. Отказ от разрушающих испытаний КЛ повышенным выпрямленным напряжением, переход на щадящие испытания оборудования с использованием портативных испытательных установок на переменном напряжении. Разработка нового единого нормативного документа по испытаниям с учетом новых типов изоляции. Силовые кабели с СПЭ-изоляцией испытывать только переменным повышенным напряжением. 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.

Литература

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. **ТУ 16.К71-335-2004** "Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20 и 35 кВ".
5. **МЭК 60502-2.** Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение от 1 до 30 кВ.
6. **РД 34.45-51.300.97.** Объем и нормы испытаний электрооборудования. Издание 6-ое. М.: ЭНАС, 1998
7. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ ЭП). Утверждены Министерством энергетики РФ 13 января 2003 г.
8. **Инструкция** по эксплуатации силовых кабельных линий. Часть 1. Кабельные линии напряжением до 35 кВ. М.: СПО Союзтехэнерго, 1980.
9. **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

УДК 621.318.762

С.И. ЕВСИН, к.т.н., зам. дир. ИВЦ,
В.Б. ХАРЬКОВСКИЙ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Разработка и исследование герметизаторов элегазовых коммутационных аппаратов с магнитожидкостным уплотнителем

Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией имеют преимущества перед другими типами аппаратов по габаритам и массе. Наиболее полно преимущества элегазовых аппаратов проявляются в комплектных распределительных устройствах (КРУЭ), где все элементы – выключатель, разъединители, короткоза-

мыкатели, трансформаторы тока и напряжения имеют элегазовую изоляцию. В настоящее время выпускаются КРУЭ на 110-500 кВ и отдельно стоящие выключатели на 110-750 кВ. В электрических аппаратах элегаз используется при давлении 0,3-0,7 МПа, срок эксплуатации без ревизии и ремонта составляет не менее 10 лет. Поэтому элегазовые аппараты должны обладать высокой герметичностью. В настоящее время для отечественных аппаратов нормируемая утечка в год составляет 1%, а для некоторых зарубежных – 0,5%.

В высоковольтных коммутационных аппаратах передача движения от привода к контактной системе осуществляется посредством возвратно-вращающегося вала или возвратно-поступательно движущегося (ВПД) штока. Обеспечение надежности узла герметизации вала (штока) представляет собой сложную задачу из-за больших скоростей движения контактной системы, сезонных колебаниях температуры и большом ресурсе работы.

Обычно в узлах герметизации в качестве уплотнителей используются резиновые кольца, сальники и их комбинации. Для снижения сил трения и нагрузки на привод движения, повышения ресурса работы уплотнительного узла и уровня его герметичности следует использовать уплотнения, основанные на бесконтактном принципе.

Создание качественно нового материала – магнитной жидкости (МЖ) привело к появлению магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ), которые условно относятся к бесконтактным уплотнениям с уплотнителем из магнитной жидкости, удерживаемым в активной зоне магнитным полем. Классический МЖГ (рис. 1, а) состоит из аксиально намагниченного кольцевого постоянного магнита 3 и примыкающих к нему с торцов двух полюсных приставок 4, установленных в немагнитном корпусе 2 и охватывающих вал 1 с рабочим зазором. Полюсные приставки и вал изготавливаются из магнитомягкого материала. В целях создания в рабочем зазоре градиентного магнитного поля зазор выполняется неравномерным, зубчатым. Под воздействием магнитного поля МЖ образует в рабочем зазоре кольцеобразные магнитожидкостные уплотнители 5 по числу зубцов полюсных приставок. Каждый магнитожидкостный уплотнитель способен удерживать определенный перепад давлений. Максимальный перепад давлений, удерживаемый МЖГ, пропорционален числу отдельных уплотнителей. Такие герметизаторы обладают высокой герметичностью (натекание не хуже 10^{-6} Па·м³/с), низкими уровнями жидкостного трения и сопротивления вращению вала, достаточно большим ресурсом работы при температурах от -100°С до +120°С.

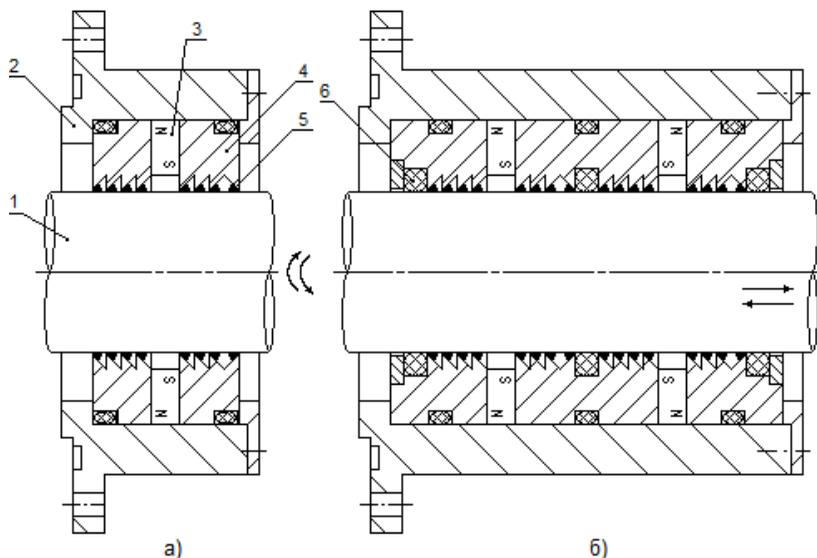


Рис. 1. а) – классический МЖГ, б) – традиционный МЖГ: 1 – вал; 2 – корпус из немагнитного материала; 3 – постоянный магнит; 4 – полюсная приставка; 5 – магнитожидкостный уплотнитель; 6 – резиновое кольцо

Разработанные конструкции МЖГ могут быть использованы в элегазовых выключателях, где от них по герметичности и температуре требуются параметры несколько ниже достигнутых. МЖ в выключателях в основном будет работать в статическом режиме, не испытывая непрерывного гидродинамического течения и нагрева. В элегазовых аппаратах для привода вращения для контактов применение МЖГ вместо резиновых колец позволяет заменить граничное трение жидкостным, что будет способствовать уменьшению момента трения. Проведенные испытания выключателя ВЭГ-35 с МЖГ ввода вращения подтвердили целесообразность использования данного типа герметизаторов. Однако возрастают габариты узла герметизации, а также появляются повышенные требования к точности изготовления и сборки узлов привода движения.

Во многих конструкциях элегазовых выключателей управление контактами осуществляется с помощью штока, совершающего ВПД со скоростью до 10 м/с и амплитудой 0,2 м. Однако условия работы МЖГ при ВПД штоке настолько отличаются от условий работы при вращающемся вале, что использование их классической конструкции для вводов ВПД успеха не имело. Недостаточно были изучены физика процессов в МЖГ при ВПД штока и их влияние на работу магнитожидкостного уплотнителя.

В ИГЭУ были разработаны и испытаны две конструкции МЖГ для ВГД штока привода контактов элегазового выключателя. В первой конструкции в корпусе полюса между съемными стальными зубцами расположены фторопластовые шайбы, обеспечивающие работу МЖГ при поступательном движении штока. Исследования показали, что шайбы незначительно увеличивают силу сопротивления движению. Однако конструкция сборного полюса получилась более сложной, чем в классическом МЖГ. Возникли трудности в обеспечении необходимой равномерности рабочего зазора между штоком и зубцами. Вторая конструкция МЖГ (рис. 1, б) отличалась от классической тем, что в каждой полюсной приставке было установлено резиновое кольцо б, ограничивающее натекание газа при движении штока. Контактное давление резины на шток в этом комбинированном уплотнении значительно меньше, чем в традиционном резиновом уплотнителе. Исследования показали, что обе конструкции МЖГ обладают примерно одинаковой герметичностью. При неподвижном штоке герметичность была не хуже 10^{-8} Па·м³/с, а при движении штока – не хуже 10^{-5} Па·м³/с. Установлено, что после динамического режима МЖГ восстанавливает уровень герметичности до 10^{-8} Па·м³/с. Это показывает, что при большой скорости движения штока герметичность обеспечивается фторопластовыми шайбами или резиновыми кольцами, контактные поверхности которых обильно смазаны МЖ. Расчет показывает, что в реальном элегазовом выключателе из-за утечки через МЖГ давление уменьшится не более чем на 0,1% в год. Таким образом, разработанные и исследованные конструкции МЖГ по герметичности и ресурсу отвечают требованиям элегазовых выключателей.

В ЛенПО «Электроаппарат» испытаны макетные образцы МЖГ на специальном стенде для исследования герметизирующих устройств элегазовых выключателей. Уровень герметичности определялся галогенным течеискателем, позволяющим измерять натекание элегаза с точностью до $2 \cdot 10^{-12}$ Па·м³/с. Испытания проводились в течении года. За это время выполнено 1000 циклов ВГД штока. В статике герметичность была не ниже 10^{-8} Па·м³/с, в динамике - 10^{-5} Па·м³/с. Установлено, что после динамического режима МЖГ в течение нескольких секунд восстанавливает уровень герметичности до 10^{-8} Па·м³/с. Испытания МЖГ в условиях близких к реальным также показали, что соответствуют требованиям элегазовых коммутационных аппаратов по герметичности и ресурсу работы.

К вопросу ограничения коронного разряда на высоковольтных воздушных линиях электропередачи повышенной частоты

В настоящее время благодаря появлению эффективных полупроводниковых преобразователей напряжения большой мощности существует техническая возможность создания и практического применения 2-х проводных воздушных линий электропередач (ВЛЭП) повышенной частоты с несинусоидальной формой напряжения высокого, сверх- и ультравысокого напряжения. Одним из факторов, оказывающих значительное влияние на КПД ВЛЭП и технико-экономические показатели передачи электроэнергии, являются потери, вызванные коронным электрическим разрядом в форме «местной короны». Доля этих потерь может достигать 50% и более. Поэтому при определении перспективности применения электропередач повышенной частоты необходимо оценить условия коронного разряда на таких электропередачах.

Существуют различные способы расчётного определения потерь электроэнергии, вызванных местным коронным электрическим разрядом на проводах ВЛЭП. Для предварительных оценок удобно воспользоваться формулой расчета среднегодовых потерь мощности на корону на ВЛЭП промышленной частоты в Вт/м [1].

$$P_K = 2,5 \cdot 10^{-10} \cdot U_\phi^2 \cdot \left(\frac{U_\phi}{U_K} \right)^5 \cdot [1 - 0,35 \cdot (j - 0,2)], \quad (1)$$

где U_ϕ и U_K – действующие значения фазного напряжения и критического напряжения коронного разряда (напряжения появления «общей короны» на проводах ВЛЭП), В; j – среднеквадратичная плотность тока в проводах ВЛЭП, А/мм²; формула справедлива для $0,5 \leq U_\phi / U_K \leq 0,95$. В настоящее время оптимальный уровень ограничения коронного разряда колеблется в пределах $(U_\phi / U_K)_{opt} = 0,8 \div 0,92$.

Влияние частоты переменного напряжения на величину потерь коронного разряда можно определить по формуле потерь энергии за период приложенного напряжения [2]

$$\frac{P_{Kf}}{f} = A \cdot f^{-\alpha}, \quad (2)$$

где P_{Kf} – мощность потерь на корону при произвольном значении частоты переменного напряжения f ; A и $\alpha = 0,38$ – постоянные коэффициенты.

Из (2) очевидно, что мощность потерь на корону определится выражением

$$P_{Kf} = A \cdot f^{1-\alpha} = A \cdot f^{0,64}. \quad (3)$$

Тогда величина мощности потерь, выраженная в относительных значениях, где за единицу принята мощность при напряжении промышленной частоты P_E , определяется соотношением

$$P_K^* = \frac{P_{Kf}}{P_K} = \left(\frac{f}{50} \right)^{0,64}. \quad (4)$$

Анализ приведенных выражений (1)÷(4) позволяет сделать вывод, что по мере увеличения частоты рабочего напряжения ВЛЭП f требуется всё более глубокое ограничение коронного разряда посредством увеличения критического напряжения U_K . Например, расчёты, выполненные с использованием этих формул, показывают, что при условии неизменной величины мощности потерь $P_K^* = 1$ (т.е. КПД электропередачи) для $f = 1000$ Гц критическое напряжение коронного разряда U_{Kf} линии повышенной частоты должно не менее, чем на 32 % превышать аналогичный показатель U_K линии 50 Гц.

Оценить возможность требуемого ограничения коронного разряда удобно на основе сравнения с существующими ВЛЭП сверхвысокого напряжения. Современная 3-х фазная ВЛЭП 500 кВ имеет типичную конструкцию расщеплённой фазы: 3хАС 400. Замена такой линии 2-х проводной ВЛЭП повышенной частоты при неизменном значении фазного напряжения и номинальной мощности приведёт к увеличению рабочего тока и суммарного сечения проводов фазы в 1,5 раза. В этом случае удобным вариантом конструкции расщеплённой фазы является 6хАС 300. С использованием методики [1] выполнены расчёты относительного увеличения критического напряжения короны

$$\Delta U_{Kf}^* = \frac{U_{Kf} - U_K}{U_K} \cdot 100\%,$$

результаты которых представлены на рис.1

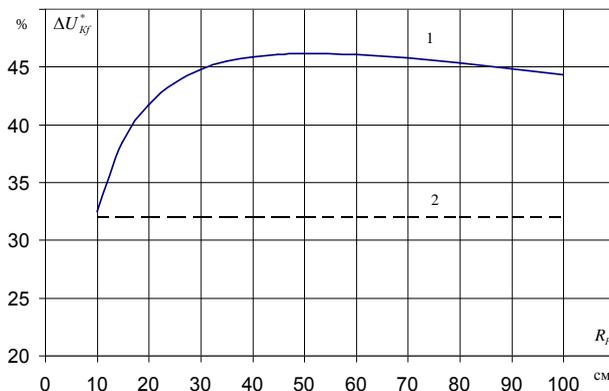


Рис. 1. Зависимости относительного увеличения критического напряжения коронного разряда от радиуса расщепления: 1 – расчётная зависимость; 2 – требуемое увеличение критического напряжения коронного разряда

Полученный результат (рис.1) свидетельствует о том, что при значениях радиуса расщепления, представляющих практический интерес (свыше $15 \div 20$ см), фактическое увеличение критического напряжения существенно превышает требуемое значение. Это даёт основание полагать, что применение высоковольтных ВЛЭП повышенной частоты не должно привести к серьёзным проблемам с ограничением коронного разряда.

Вместе с тем, нельзя не отметить приближенный характер приведенных расчётных оценок, т.к. многие аспекты коронного разряда недостаточно ясны, например, практически отсутствуют сведения о влиянии формы осциллограммы переменного напряжения на показатели коронного разряда. Требуется продолжение экспериментальных и теоретических исследований по этой тематике с целью обоснованного выбора и оптимизации конструкции ВЛЭП повышенной частоты по условиям ограничения коронного разряда.

Литература

1. **Г.Н. Александров.** Сверхвысокие напряжения. Л., «Энергия», 1973. 182 с.
2. **Г.Н. Александров.** Коронный разряд на линиях электропередачи. М.-Л., «Энергия», 1964. 228 с.

УДК 621.314: 621.3.051.025

А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент,
В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,
А.М. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент,
КАРВАЛЬЮ НАДИР КАРИНА НЕТО
АФРИКАНУ ДЕ, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

К вопросу определения параметров двухпроводных воздушных линий электропередачи переменного тока различной конструкции

При исследовании установившихся и переходных режимов работы, а также для оценки грозоупорности 2-х проводных воздушных линий электропередач (ВЛЭП) повышенной частоты, выполненных на основе полупроводниковых преобразователей напряжения большой мощности, требуется знание параметров таких линий: погонные индуктивность и ёмкость, волновое сопротивление и натуральную мощность.

На основе теоретических методов расчета электростатических и магнитных полей [1,2] разработана методика расчёта указанных выше параметров для трёх перспективных вариантов конструктивного выполнения ВЛЭП таких электропередач: 1) с одним проводом в фазе и при расположении проводов разных фаз на одинаковой высоте с использованием типовых одностоечных железобетонных (металлических) опор, 2) то же, что и в первом варианте, но при наличии нескольких проводов в фазе, расположенных в одной (вертикальной) плоскости («плоская фаза»), 3) ВЛЭП с расщеплёнными проводами коаксиальной конструкции с использованием нестандартных опор portalного типа. Последние два варианта относятся к ВЛЭП повышенной пропускной способности [3]. При вычислении параметров линий предполагается, что напряжения разных фаз двухпроводной линии имеют сдвиг по фазе 180° . Изоляционные расстояния выбирались в соответствии с требованиями ПУЭ.

С использованием предложенной методики выполнены расчёты параметров указанных вариантов двухпроводных линий применительно к рабочему напряжению, соответствующего классу 110 кВ 3-х фазных электропередач. Предполагается, что электропередачи повышенной частоты такого класса напряжения должны получить применение в первую очередь. Результаты расчетов приведены в таблице в виде диапазона значений, в пределах которых может колебаться величина параметров ЛЭП в зависимости от геометрических размеров и конструктивного выполнения линии.

Полученные результаты в сопоставимых условиях хорошо коррелируются с показателями современных 3-х фазных ВЛЭП, являются основой дальнейших исследований, а также свидетельствуют о высокой эффективности 2-х проводных ЛЭП переменного тока повышенной

пропускной способности. Анализ этих результатов дает основание полагать также, что такие линии должны обладать высокой грозоупорностью, особенно в случае применения опор из электроизоляционного бетона. Это позволит, по-видимому, отказаться от применения тросовой грозозащиты по всей длине этих ВЛЭП с получением значительного экономического эффекта.

Таблица.

Конструкция 2-х проводной ВЛЭП	Погонная ёмкость \tilde{N}_0	Погонная индуктивность L_0	Волновое сопротивление Z	Натуральная мощность (на фазу) P_f	Типовое значение натуральной мощности 3ф ЛЭП (на фазу)[4] $P_f^{3\phi}$
	ПФ/м	мкГн/м	Ом	МВт	МВт
Один провод в фазе	10÷11	1,25÷1,15	360÷325	11÷12,5	10
«Плоская фаза»	17÷24	1÷0,67	270÷210	16,5÷24	
Коаксиальная конструкция	26÷36	0,3÷0,08	110÷48	37÷85	

Литература

1. Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. Ч.2. М., «Энергия», 1966. 408 с.
2. Г.Н.Александров. Сверхвысокие напряжения. Л., «Энергия», 1973. 182 с.
3. Г.Н. Александров. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности. Электричество. №7, 1981, с. 1-6.
4. Справочник по проектированию электрических сетей. Под ред. Д.Л. Файбисовича. М., Издательство НЦ ЭНАС. 2006. 350 с.

УДК 621.314: 621.3.051.025

А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент,
В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,
А.М.СОКОЛОВ, к.т.н., доцент, (ИГЭУ) г. Иваново

Методика оценки характеристик установившихся режимов работы асинхронных линий электропередачи при глубоком регулировании величины и фазы напряжений

Новейшие разработки в сфере мощных полупроводниковых преобразовательных установок для электроэнергетики [1] открывают возможность создания и применения асинхронных электропередач переменного тока нового поколения, имеющих простое, 2-х проводное исполнение и повы-

шенную частоту рабочего напряжения. Посредством управления силовыми электронными элементами, входящими в состав преобразователей напряжения, можно обеспечить глубокую регулировку напряжения на разноимённых проводах двухпроводной линии электропередачи (ЛЭП) как по величине, так и по фазе. Такую возможность удобно использовать для обеспечения рациональных режимов работы этих ЛЭП.

При повышении частоты f рабочего напряжения ЛЭП наблюдается увеличение реактивной мощности линии: как зарядной мощности ёмкости изоляции $Q_C = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0$, так и индуктивности проводов $Q_L = I^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_0$ (в расчёте на единицу длины линии), где C_0 и L_0 - ёмкость и индуктивность ЛЭП на единицу длины. Поэтому наилучшим режимом работы ЛЭП повышенной частоты, по-видимому, следует рассматривать такой, когда обеспечивается равенство $Q_C = Q_L$ и отпадает необходимость в применении на линии устройств продольной и поперечной компенсации. Это достигается в том случае, когда ЛЭП при любой нагрузке работает в режиме передачи натуральной мощности [2], которая определяется в расчёте на фазу по формуле

$$P_i = \frac{U^2}{Z}, \quad (1)$$

где U – фазное напряжение, $Z = \sqrt{L_0 / C_0}$ – волновое сопротивление ЛЭП.

Из приведенной формулы видно, что эффективным средством настройки линии в режим натуральной мощности является изменение величины фазного напряжения. Существующие схмотехнические решения [1] позволяют осуществлять, в основном, ступенчатую регулировку напряжения. Поэтому важно иметь возможность плавной настройки, и этого можно добиться посредством управления величиной волнового сопротивления. Такое изменение достигается регулировкой сдвига по фазе $\varphi = 0 \div 180^\circ$ между напряжениями на фазах двухпроводной линии, в результате чего изменяется значение погонной ёмкости C_0 [3,4].

В результате составления и решения систем потенциальных уравнений [3,4] получена формула для определения погонной ёмкости 2-х проводной линии в зависимости от угла сдвига по фазе

$$C_0 = \frac{\alpha_{22} - \alpha_{12} \cdot \cos \varphi}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2}, \quad (2)$$

где α_{11} и α_{22} – собственные потенциальные коэффициенты проводов разных фаз, α_{12} – взаимный потенциальный коэффициент.

Формулы (1) и (2) позволяют наряду с определением величины натуральной мощности оценить её изменение при регулировке φ от 0 до 180° , выраженное в относительных величинах

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{P_H^{\max}} \cdot 100\% = \frac{P_H^{\max} - P_H^{\min}}{P_H^{\max}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где P_H^{\min} и P_H^{\max} – минимальное ($\varphi=0$) и максимальное значение ($\varphi=180^\circ$) натуральной мощности.

С использованием приведенных соотношений выполнены расчёты ΔP^* для трёх перспективных вариантов двухпроводной воздушной линии (ВЛЭП), по величине фазного напряжения соответствующих 3-х фазной ЛЭП 110 кВ: 1) с одним проводом в фазе и при расположении проводов разных фаз на одинаковой высоте с использованием типовых одноствоечных железобетонных (металлических) опор, 2) то же, что и в первом варианте, но при наличии нескольких проводов в фазе, расположенных в одной (вертикальной) плоскости («плоская фаза») [5], 3) ВЛЭП с расщеплёнными проводами коаксиальной конструкции с использованием нестандартных опор порталного типа [5]. Усреднённые результаты расчётов представлены на рис. 1.

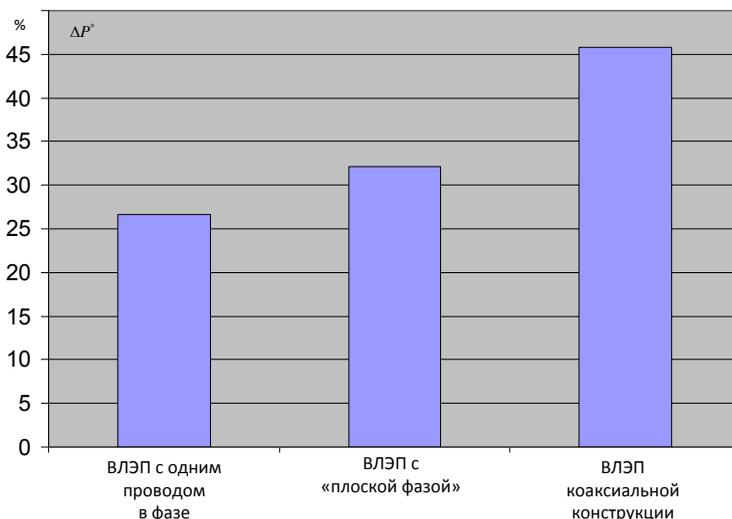


Рис. 1. Изменение натуральной мощности 2-х проводных ВЛЭП различной конструкции

Из рис. 1 можно сделать вывод, что изменение натуральной мощности ВЛЭП посредством изменения угла сдвига по фазе между

напряжениями разных фаз является весьма эффективным способом управления рассматриваемыми электропередачами. Например, даже в случае ВЛЭП с одним проводом в фазе натуральная мощность может изменяться более, чем на 25 %, а в случае ВЛЭП повышенной пропускной способности (с «плоской фазой» и коаксиальной конструкции) эффективность управления значительно возрастает.

Несомненно, что задачей дальнейших исследований является определение рационального сочетания различных способов управления и оптимальных режимов работы асинхронных электропередач повышенной частоты.

Литература

1. **Ситников В.Ф.** Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока// Электричество. -2008. -№2. -С. 33-38.
2. **Г.Н. Александров.** Передача электрической энергии переменным током. 2-е изд. – М.: Знак, 1998. – 271 с.
3. **Л.Р. Нейман,** К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. Ч.2. М., «Энергия», 1966. 408 с.
4. **Г.Н.Александров.** Сверхвысокие напряжения. Л., «Энергия», 1973. 182 с.
5. **Г.Н. Александров.** Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности. Электричество. №7, 1981, с. 1-6.

УДК 621.314: 621.3.051.025

А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент,
В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,
Ю.А.МИТЬКИН, д.т.н., профессор,
А.М.СОКОЛОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

К вопросу об электрической прочности внутренней изоляции электроэнергетического оборудования при воздействии переменного напряжения повышенной частоты

В связи с наметившейся тенденцией применения полупроводниковой преобразовательной техники для создания малогабаритных источников питания высокого напряжения и возможностью создания локальных высоковольтных систем электроснабжения на основе такой техники, имеющих повышенную частоту и несинусоидальную осциллограмму переменного напряжения, весьма актуальной задачей становится квалифицированный подход к конструированию внутренней изоляции оборудования таких систем.

Как известно [1,2], для выбора изоляции из органических материалов, получившей основное применение в изоляционных конструкци-

ях электроэнергетического оборудования, требуется знание важнейшей характеристики: зависимости срока службы изоляции τ («время жизни») от напряженности электрического поля E при различных видах воздействующего напряжения (рабочее, грозовые и внутренние перенапряжения). Для распространённых полимерных материалов (полиэтилен, полистирол, органическое стекло и др.) эта зависимость удовлетворительно описывается формулой [1]

$$\tau = B \cdot E^{-m},$$

которая в логарифмической системе координат имеет вид прямой с изломом в точке E^* , B и m – постоянные коэффициенты: $m=3\div 4$ для $E < E^*$ (этот диапазон соответствует подавляющему большинству практических случаев) и $m=10\div 12$ для $E > E^*$.

Кроме этого, необходимо иметь сведения о влиянии на зависимость $\tau(E)$ различных факторов, прежде всего, температуры, частоты переменного напряжения, формы его осциллограммы. Как показано в [1], для упомянутых выше материалов при температуре вплоть до 100 °С, что соответствует диапазону рабочей температуры различного электроэнергетического оборудования, практически отсутствует влияние этого параметра. Однако для таких распространённых видов внутренней изоляции, как бумажно-масляная и барьерно-масляная, пренебрегать влиянием температуры уже нельзя [2].

Решающее значение при конструировании внутренней изоляции оборудования повышенной частоты будет иметь знание о влиянии на её электрическую прочность частоты переменного напряжения f . Согласно [1] для полимерных материалов, указанные выше, при $E < E^*$ срок службы изоляции уменьшается обратно-пропорционально увеличению частоты, т.е. приблизительно соблюдается соотношение $\tau \cdot f = const$ при $E = const$. При этом наблюдается смещение точки излома в соответствии с формулой [1]

$$\lg E^* = \lg K - \frac{1}{m} \cdot \lg f,$$

где K – коэффициент, который не зависит от частоты и определяется условиями охлаждения изоляции.

Для оценки влияния частоты напряжения на электрическую прочность маслонеполненной изоляции можно воспользоваться соотношением для определения напряжения электротеплового пробоя [2]

$$U_{пр} = 3,82 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_r}{f \cdot \epsilon_r \cdot tg\delta \cdot \alpha}} \cdot \varphi(c),$$

где γ_r – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, ϵ_r – абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляционного мате-

риала, $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, α – температурный коэффициент $tg\delta$, $\varphi(c)$ – функция, значение которой определяется конструктивным выполнением изоляции.

Анализ имеющихся сведений позволяет сделать вывод о существенном влиянии частоты переменного напряжения на электрическую прочность внутренней изоляции при отсутствии однозначности в определении степени этого влияния. Практически отсутствует информация о влиянии формы осциллограммы переменного напряжения на электрическую прочность внутренней изоляции.

Для обоснованного выбора и разработки системы профилактики внутренней изоляции электроэнергетического оборудования повышенной частоты требуется проведение всесторонних исследований различных характеристик такой изоляции применительно к реальным условиям её эксплуатации.

Литература

1. **С.Н. Койков**, А.Н. Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков. Л., «Энергия». 1968. 186 с.
2. **Н.П. Богородицкий**, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Электротехнические материалы. Л., Энергоатомиздат. 1985. 304 с.

УДК 621.314: 621.3.051.025

А.М.СОКОЛОВ, к.т.н., доцент,
КАРВАЛЬЮ НАДИР КАРИНА НЕТО
АФРИКАНУ ДЕ, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

Методика оценки устойчивости канала газового разряда при стримерном механизме

Несмотря на большой объём экспериментальных сведений и теоретических разработок по физике газового разряда, до сих пор не удалось создать универсальную математическую модель этого физического явления, например при стримерном механизме его развития. Наличие такой модели позволило бы решать большой круг практических задач, не прибегая к сложным, дорогостоящим и длительным экспериментальным исследованиям. Распространённым примером таких задач является определение импульсной прочности внешней изоляции воздушных ЛЭП и ОРУ при расчётах их грозоупорности и грозозащиты.

Известно, что при стримерном механизме электрического разряда в газе нарушение электрической прочности изоляционного промежутка связано с разогревом канала стримера до температуры термической ионизации потоком электрических зарядов (электронов), содержа-

щихся в канале стримера [1]. При этом должна быть обеспечена стабильность стримерного канала в пространстве и во времени. Определение условий этой стабильности является, по-видимому, одним из ключевых моментов в определении условий нарушения электрической прочности газового промежутка при стримерном механизме пробоя.

Как известно, стример представляет собой прямолинейный канал диаметром $2 \cdot r_s$ доли мм, который формируется в результате слияния большого числа электронных лавин сдвинутых в пространстве и во времени. Лавины образуются на кончике стримерного канала и приводят к его удлинению со скоростью $10^8 \div 10^9$ см/с, что, как минимум, на порядок выше скорости перемещения электронов вдоль канала стримера под действием напряженности электрического поля E [1]. Поэтому к моменту пересечения всего воздушного изоляционного промежутка канал стримера можно считать электрически нейтральным, т.к. количество зарядов противоположного знака в нём практически одинаково.

В этом случае возникают два основных явления: процесс диффузии электрических зарядов, прежде всего, электронов, как более подвижных частиц и процесс перемещения электронов под действием электрического поля. Первое явление представляет собой перемещение электронов от оси канала стримера в направлении, перпендикулярном оси. Плотность потока диффузии электронов определяется из дифференциального уравнения [2]

$$j_e = -D \cdot \frac{\partial \rho_e}{\partial x} + v_r \cdot \rho_e, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; ρ_e – плотность электронов в канале стримера; x – координата в направлении перпендикулярном оси стримера; v_r – скорость перемещения электронов в сторону оси стримера в направлении перпендикулярном оси под действием внешней силы. Этот процесс при $v_r = 0$ приводит к рассеиванию электронов в окружающее пространство, т.е. разрушению канала стримера, делая невозможным его разогрев и образование искрового канала.

Второй процесс, движение электронов вдоль канала стримера под действием электрического поля, можно представить, как протекание тока в пучке проводников бесконечно малого сечения ds . Благодаря тому, что направление и величина тока i во всех элементарных проводниках одинаковы, может быть найдена сила взаимного притяжения двух таких проводников вследствие взаимодействия их магнитных полей согласно [1] и [3] по формуле

$$dF = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot i^2}{d} = \frac{\mu_0 \cdot q_e^3 \cdot E \cdot \lambda_e \cdot \rho_e^2}{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot d} \cdot ds, \quad (2)$$

где q_e , m_e , λ_e – заряд, масса, длина свободного пробега электрона; d – расстояние между элементарными проводниками.

Соотношение (2) позволяет определить силу, действующую на движущиеся по каналу стримера электроны на внешней границе стримерного канала, посредством интегрирования:

$$F = \int_S dF, \quad (3)$$

где $S = \pi \cdot r_s^2$ – площадь поперечного сечения канала стримера.

Эта сила направлена в сторону и перпендикулярно оси стримерного канала, что противодействует процессу диффузии электронов, т.е. разрушению стримерного канала т.к. она обуславливает перемещение электронов в этом направлении со скоростью [1]

$$v_r = \sqrt{\frac{F \cdot \lambda_e}{2 \cdot \rho_e \cdot m_e}} \quad (4)$$

Устойчивость стримерного канала обеспечивается, по крайней мере, тогда, когда оба явления полностью уравновешивают друг друга, что соответствует выполнению в формуле (1) условия

$$j_e = 0. \quad (5)$$

С использованием приведенных выше соотношений дифференциальное уравнение (1) может быть решено относительно E . Результаты такого решения с учётом возможного колебания некоторых исходных параметров согласно литературным источникам дают $E=2\div 8$ кВ/см. Это согласуется с показателями электрической прочности воздушных промежутков с неоднородным электрическим полем, составляющей $5\div 10$ кВ/см [1]. Однако при использовании предлагаемой методики существует неопределённость в определении некоторых исходных величин, например r_s , ρ_e , λ_e . Требуется продолжение исследований и разработок по этой тематике с целью уточнения и усовершенствования предложенной расчётной методики.

Литература

1. **Г.Н. Александров**, В.Л. Иванов, В.Е. Кизеветтер. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Л., «Энергия», 1969. 240 с.
2. **Б.М. Яворский**, А.А. Детлаф. Справочник по физике. м., Наука, 1990. 624 с.
3. **Л.Р. Нейман**, К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники ч.2. М., «Энергия», 1966. 408 с.

Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор,
 А.М. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент,
 КАРВАЛЬЮ НАДИР КАРИНА НЕТО
 АФРИКАНУ ДЕ, студент
 (ИГЭУ) г. Иваново

К расчёту температурных полей в объёме электротехнического материала при неоднородном распределении диэлектрических потерь

При решении широкого круга практических задач использования различных электротехнических материалов большое значение имеют температурные показатели, например абсолютное значение температуры, температурное поле в объёме материала. При отсутствии внешнего источника тепла нагрев материала происходит вследствие диэлектрических потерь, которые, как правило, имеют неравномерный характер распределения в объёме материала. Основной причиной этого является неоднородность электрического поля в толще материала. В этом случае объёмная плотность мощности источника тепла в любой точке материала может быть определена по формуле [1]

$$q_V = E^2 2\pi f \varepsilon_a \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля в заданной точке материала, f – частота приложенного переменного напряжения, ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость материала, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в заданной точке.

Изучение закономерностей распределения температуры материала в его объёме удобно выполнить на примере одномерного температурного поля в соответствии с расчётной схемой рис.1. В этом случае уравнение теплопереноса [2] приобретает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_V(x)}{c \cdot \rho}, \quad (2)$$

где T – значение температуры в произвольной точке с координатой x (рис.1) в произвольный момент времени t ; $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности материала; c – удельная теплоёмкость материала; ρ – плотность материала; $q_V(x)$ – закон изменения мощности объёмного источника теплоты вдоль координаты x (рис.1), может быть определён с помощью формулы (1), если известны законы изменения $E(x)$ и $\operatorname{tg} \delta(x)$.

С целью упрощения анализа температурного поля целесообразно рассмотреть стационарный режим $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, т.к. в большинстве

практических случаев температура материала изменяется медленно и распределение температуры можно считать близким к стационарному. Кроме этого, можно предположить линейный закон изменения мощности объёмного источника теплоты (рис. 1):

$$q_V(x) = q_m - \beta \cdot x, \quad (3)$$

т.к. с помощью кусочно-линейной аппроксимации можно описать любой закон.

В результате решения уравнения (2) с учётом отмеченных выше условий получено следующее выражение для определения температуры в произвольной точке x

$$T_x = T_0 - (q_m \cdot \frac{x^2}{2} - \beta \cdot \frac{x^3}{6}), \quad (4)$$

где T_0 – значение температуры в точке $x=0$.

На рис.1 представлены результаты расчёта с использованием формулы (4) для характерных условий эксплуатации и размеров полиэтиленовой изоляции, электрофизические и теплофизические показатели которой взяты согласно [1].

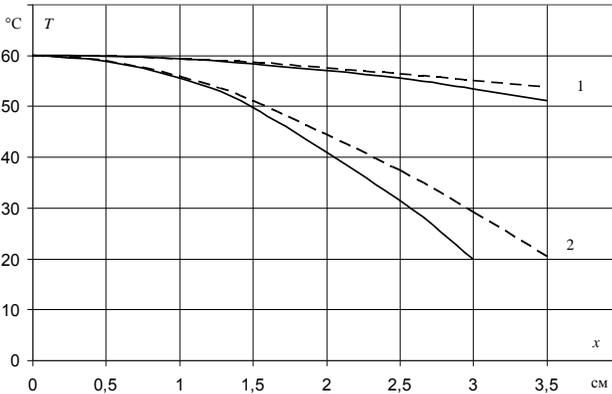


Рис. 1. Результаты расчёта температурного поля:
 1 – $E=2$ кВ/мм; 2 – $E=5$ кВ/мм; сплошные линии – равномерное тепловыделение: $q_V(x) = q_m$; пунктирные линии – изменение тепловыделения согласно (3) при условии $q_V(x \geq 3,5\text{см}) = 0$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительно большем влиянии на характер температурного поля в материале абсолютного значения мощности объёмного тепловыделения (1), чем его неоднородность (3), хотя и последним фактором пренебрегать нельзя. Очевидно также, что однородное выделение тепла в объёме материала вовсе не означает и однородного температурного поля.

Приведенные соотношения и методика расчёта, дополненные определением граничных условий, позволяют выполнять теоретические исследования температурных полей в объёме различных электротехнических материалов при решении разнообразных практических задач: например, достижение максимальной однородности температурного поля для равномерного прогрева материала, либо получения максимально возможной неоднородности такого поля с целью интенсификации охлаждения или термического разрушения.

Литература

1. **Н.П. Богородицкий**, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Электротехнические материалы. Л., Энергоатомиздат. 1985. 304 с.
2. **Федосов С.В.** Теплоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Монография – Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010. – 364 с.

УДК 621.314: 621.3.051.025

А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент,
В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,
Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор,
А.М. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Перспективы создания высоковольтных систем электроснабжения промышленных предприятий на основе полупроводниковых преобразователей напряжения

Бурный прогресс в сфере силовой электроники и мощных полупроводниковых преобразовательных установок [1] создают благоприятные условия для разработки и применения локальных промышленных высоковольтных систем электроснабжения на основе такой техники. Для определения перспективности научно-технического прогресса в этом направлении необходима оценка различных показателей подобных систем. Одним из важнейших параметров является предельные значения передаваемой мощности по электрическим сетям таких систем, которые, как правило, выполняются с помощью кабельных линий. Учитывая, что в настоящее время существует техническая возможность создания полупроводниковых преобразователей напряжения значительной мощности [1], предельная передаваемая мощность будет определяться пропускной способностью высоковольтных кабельных линий. Одновременно необходимо учитывать возможность и целесообразность применения повышенной частоты переменного однофазного напряжения в таких системах, что наряду с уменьшением размеров

кабельных линий, позволит уменьшить габариты и вес трансформаторных узлов подстанций. Эти качества могут оказаться весьма полезными в стеснённых условиях производственных помещений.

Как показывает анализ существующих конструкций высоковольтных кабелей, они малопригодны для эксплуатации в таких системах электроснабжения. Эти кабели имеют большое сечение токоведущих жил и при повышенной частоте будет в сильной степени сказываться поверхностный эффект, приводящий к значительному снижению эффективности использования сечения. В этом случае значительно лучший результат, по-видимому, можно получить при использовании в таких системах радиокабелей большой мощности, например, коаксиальных кабелей типа РК-50-11-11(13) и РК-50-11-21. Особенностью конструкции этих кабелей является то, что центральная жила выполнена свитой из большого числа тонких проводов диаметром около 1 мм. Это позволяет полностью устранить влияние поверхностного эффекта. К недостаткам этих кабелей следует отнести отсутствие сведений о предельной величине высокого рабочего (номинального) напряжения, что препятствует оценке пропускной способности таких кабельных линий.

С использованием имеющихся в литературе сведений о кратковременной и длительной электрической прочности применяемых в этих кабелях изоляционных материалов (полиэтилен, фторопласт) [2,3], а также существующей методики выбора твердой изоляции по расчётному сроку её службы $\tau_{сл} = 20$ лет (такое значение является характерным для производственных систем электроснабжения) определены рабочая напряженность электрического поля в изоляции $E_{раб}$ и рабочее напряжение [4] $U_{раб} = E_{раб} \cdot r \cdot \ln R/r$, где r и R – радиусы внутренней жилы и наружной оболочки кабеля. По известной конструкции токоведущей жилы и допустимым токовым нагрузкам близких по конструкции высоковольтных кабелей [5] определены диапазон изменения (в зависимости от условий эксплуатации) предельной величины рабочего тока $I_{раб}$ и предельного значения передаваемой мощности $P = U_{раб} \cdot I_{раб}$. Результаты вычислений приведены в таблице. Они свидетельствуют о высокой пропускной способности кабельных линий, которая соответствует существующим маркам кабелей промышленной частоты 6 кВ, например ААШПУ, АСПЛУ, АВВГ, АПВГ с сечением жилы 10 мм². Можно сделать вывод о целесообразности продолжения исследований и разработок по применению систем электроснабжения на основе полупроводниковых преобразователей.

Таблица.

Тип кабеля (изоляция)	$2r$, мм (жила)	$2R$, мм	$E_{раб}$ кВ/мм	$U_{раб}$ кВ	$I_{раб}$ А	P кВт
РК-50-11-11 (полиэтилен)	3,54 (7хØ1,18)	14,5	3,9	10	23÷54	230÷530
РК-50-11-21 (фторопласт)	3,9 (7хØ1,3)	13,4	4,8	12	28÷65	335÷780

Литература

1. **Ситников В.Ф.** Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока// Электричество. -2008. -№2. -С. 33-38.
2. **Н.П. Богородицкий**, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Электротехнические материалы. Л., Энергоатомиздат. 1985. 304 с.
3. **С.Н. Койков**, А.Н. Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков. Л., «Энергия». 1968. 186 с.
4. **Л.Р. Нейман**, К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. Ч.2. М., «Энергия», 1966. 408 с.
5. **Справочник** по проектированию электрических сетей. Под ред. Д.Л. Файбисовича. М., «Издательство НЦ ЭНАС», 2006. 350 с.

УДК 621.314: 621.3.051.025

Ю.А.МИТЬКИН, д.т.н., профессор,
А.М.СОКОЛОВ, к.т.н., доцент,
А.В. КИРИЛЕНКО, студент,
КАРВАЛЬЮ НАДИР КАРИНА НЕТО
АФРИКАНУ ДЕ, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

Экспериментальная оценка импульсной электрической прочности изделий из бетона с электроизоляционными свойствами

Одно из актуальных направлений научно-технического прогресса в сфере электроэнергетики является повышение грозоупорности воздушных линий электропередач (ВЛЭП). Эффективным средством достижения этой цели может стать широкое применение в конструкции ВЛЭП опор из электроизоляционного бетона. Подтверждением этого являются высокие показатели грозоупорности ВЛЭП на деревянных опорах, которые к настоящему времени практически вышли из употребления из-за низких механической прочности и долговечности древесины.

Изготовление опор ВЛЭП из бетона с электроизоляционными свойствами (стеклобетона) позволит существенно повысить грозоупорность ВЛЭП при сохранении высоких эксплуатационных показателей,

соответствующих линиям на металлических и железобетонных опорах. Стеклобетон (СБ) - композиционный материал, состоящий из мелкозернистого бетона (матрицы), дисперсно армированного отрезками стеклянных волокон или имеющего арматуру, выполненную из стержневых стеклопластиковых элементов. СБ сочетает в себе свойственный обычному бетону высокий предел прочности на сжатие со значительно возрастающими благодаря стеклоармированию прочностью на изгиб и растяжение (в 4-5 раз), ударной прочностью (в 10-15 раз), морозостойкостью (более 300 циклов). Относится к категории несгораемых материалов. Он водонепроницаем (W20), имеет высокую степень сцепления с обычным бетоном и обладает высокой стойкостью к трещинообразованию.

Несмотря на то, что это техническое решение известно давно, оно не получило широкого применения. Одной из причин такого положения дел является отсутствие сведений об импульсной электрической прочности изделий из СБ, без которых невозможно оценить грозоупорность ВЛЭП с опорами из этого материала и сделать выводы о целесообразности его применения.

С целью предварительной оценки такой импульсной электрической прочности выполнены сравнительные высоковольтные испытания с использованием импульса грозовых перенапряжений. Схема испытаний представлена на рис.1, где источником испытательного напряжения являлся генератор импульсных напряжений (ГИН) 300 кВ. В опытах использовались образцы изоляционного бетона и сухой древесины круглого сечения высотой 185 мм и диаметром 85 мм, а также воздушный промежуток, длина которого равна высоте образцов. В ходе опытов определялись 50%-ное разрядное напряжение $U_{0.5}$ и коэффициент крутизны «кривой эффекта» σ .

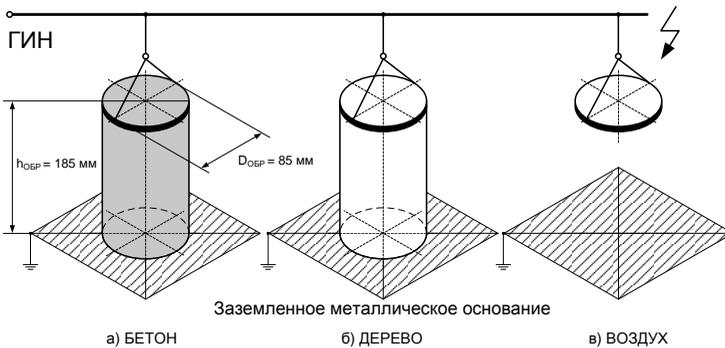


Рис. 1. Схема высоковольтных импульсных испытаний

Образец из электроизоляционного бетона был изготовлен в лаборатории с использованием прогрессивной технологии электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты и несколько раз подвергался высоковольтным испытаниям при различных сроках «созревания» бетона. Результаты испытаний в относительных значениях представлены на рис.2, где за 100 % принята величина разрядного напряжения воздушного промежутка $U_{0,5}^{возд}$.

Как свидетельствуют полученные результаты (рис.2), импульсная прочность воздушного промежутка вдоль поверхности бетона растет с течением времени после изготовления, т.е. по мере «созревания» бетона. Спустя 16 дней импульсная прочность для бетонного образца превосходит импульсную прочность изоляционного промежутка с образцом из дерева. Это даёт основание полагать, что использование ВЛЭП с опорами из электроизоляционного бетона, позволит достичь уровня грозоупорности не только сравнимого с ВЛЭП на деревянных опорах, но и, возможно, превосходящего его.

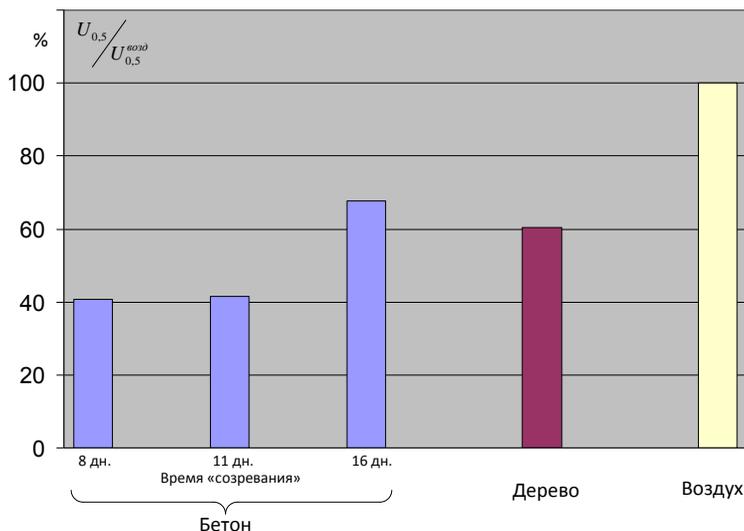


Рис. 2. Результаты высоковольтных испытаний

Предварительные оценки показывают также, что в случае использования при изготовлении опор из электроизоляционного бетона электротепловой обработки токами повышенной частоты их себестоимость может оказаться ниже по сравнению с железобетонными опорами, которые изготавливаются по традиционной технологии.

Вместе с тем, следует отметить, что использованные в экспериментах образцы не в полной мере соответствуют реальной конструкции опор из электроизоляционного бетона. Поэтому требуются дальнейшие усовершенствование методики экспериментальных исследований и выполнение теоретических разработок (например, с использованием закона преобразования масштаба и современных теоретических представлений о физике электрического пробоя) для достоверного определения импульсной электрической прочности реальных изоляционных конструкций при воздействии грозových импульсов.

Кроме этого, требуется проведение всесторонних исследований показателей грозоупорности ВЛЭП различных классов номинального напряжения и конструктивного исполнения с использованием опор из электроизоляционного бетона для окончательной оценки получаемого технического и экономического эффекта. Это позволит разработать рекомендации по эксплуатации и грозозащите таких ВЛЭП.

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

УДК 621.311.001.57

Г.В. ЧЕКАН, старший преподаватель
(ИГЭУ) г. Иваново

Разработка электронного учебника «Основы надежности электроэнергетических систем»

Для улучшения качества образовательного процесса и реализации дистанционного обучения большое значение имеет разработка специализированных программных продуктов.

Созданная программа представляет собой электронное учебное пособие «Основы надежности электроэнергетических систем», которое предназначено для подробного изучения теоретических основ надежности и их применения для расчета и проектирования электроэнергетических систем. Разработка предназначена для занятий со студентами, обучающимися по направлению «Электроэнергетика и электротехника», при изучении дисциплин «Надежность электроэнергетических систем» и «Надежность систем электроснабжения». На рис. 1 представлен общий вид интерфейса программного продукта.

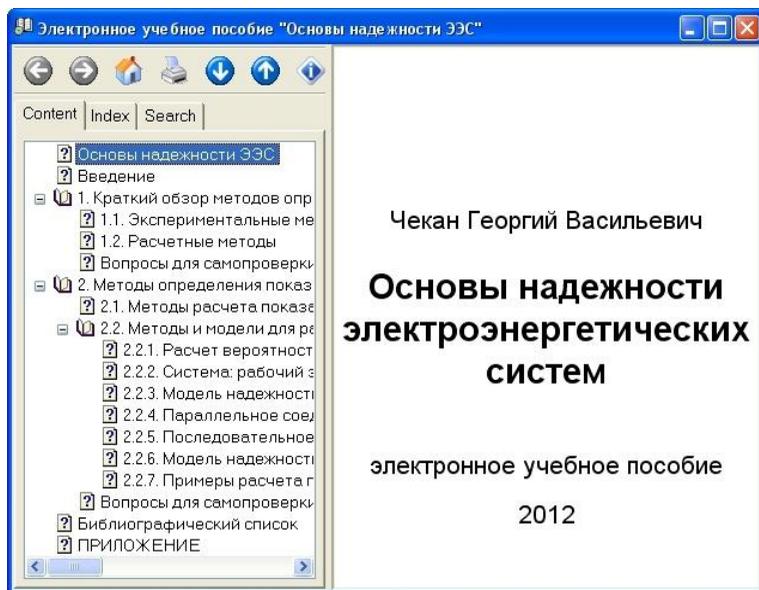


Рис. 1. Интерфейс программного продукта

Электронное учебное пособие подготовлено в операционной системе *Windows XP*, с применением средств пакета *Help & Manual*. Для подготовки графического материала использовался графический редактор *Microsoft Office Visio*, а для решения задач – программный комплекс *MathCAD*. Материал представлен в формате *Windows e-book*; для работы с ним не требуется установка стороннего программного обеспечения. Представленная разработка защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ [1].

Для создания электронного учебного пособия использовались материалы печатных источников [2-4], которые были дополнены и систематизированы. В программном продукте материал изложен в виде разделов, объединенных интерактивным оглавлением. По окончании изучения каждого раздела пользователю предлагаются контрольные вопросы, и предоставляется возможность повторно ознакомиться с неувоенным материалом. В ходе обучения имеется возможность выхода из любого раздела с использованием специального меню, а также поиск нужного материала по ключевым словам. Иллюстрация текстового материала большим количеством рисунков и схем способствует усвоению изучаемых материалов и повышает качество подготовки будущих специалистов.

На данный момент программный продукт включает в себя законченную обучающую программу с элементами контроля усвоения материала. В дальнейшем целесообразно создание специализированного модуля для проверки знаний.

Литература

1. **Чекан Г.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Электронное учебное пособие “Основы надежности электроэнергетических систем” № 2013611020. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
2. **Половко А.М.,** Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 704с.: ил.
3. **Слышалов В.К.,** Чекан Г.В. Основы расчета надежности электроэнергетических систем: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 120 с.
4. **Чекан Г.В.** Математическая модель для оценки показателей надежности замкнутой распределительной электрической сети / Г.В. Чекан // Вестник СамГТУ. Серия “Технические науки” / Самарский государственный технический университет. – Самара, –2010.–№ 4(27). –С. 242-245.

Применение напряжения 10 кВ для электроснабжения коттеджных поселков

Современное жилье человека трудно представить без электроприборов. Они настолько вошли в нашу жизнь, что жить без них не только не комфортно, но и практически невозможно. Это особенно актуально, если речь идет об индивидуальном коттедже. Вся инфраструктура индивидуального жилья основана на использовании электроэнергии [1]. Потребителями электроэнергии являются осветительное, бытовое и силовое электрооборудование и наблюдается постоянный рост потребления электроэнергии этим оборудованием [2].

Основными жизненно важными потребителями электроэнергии коттеджа являются электронасосы, подающие воду из скважин и циркуляционные насосы системы отопления, обеспечивающие дом теплом. В случае отключения электроэнергии жители остаются без света, воды и даже тепла. В результате этого система отопления может быть разморожена и придет в негодность.

Решением данной проблемы может быть присвоение таким потребителям как минимум второй категории по надежности электроснабжения и использования соответствующей схемы. Но это требует больших финансовых затрат на обеспечение резервирования с помощью второго независимого источника питания и ведет к появлению малозагруженных элементов электрической сети. Использование индивидуально источника питания типа дизель-генератор не решает проблем большой потерь электроэнергии и напряжения в электрической сети.

Возможен и другой путь решения – отказ от применяемых в настоящее время протяженных и сильно нагруженных электрических сетей напряжением 0,4 кВ и максимальное приближение электрической сети напряжением 10 кВ к потребителю, в данном случае к коттеджу. Данная схема электроснабжения позволяет отказаться от общих понижающих трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, и устанавливать индивидуальные маломощные столбовые трансформаторные подстанции.

Использование этой схемы электроснабжения позволяет также уменьшить потери мощности и электроэнергии за счет сокращения протяженности электрической сети напряжением 0,4 кВ.

Кроме того, применение данной схемы электроснабжения позволяет снизить потери напряжения, распределение которых между элементами электросети выполняется на основании расчета, исходя из допустимого установившегося отклонения напряжения. По ГОСТ 13109-97 допустимое нормальное установившееся отклонение напряжения у потребителя

составляет $\pm 5\%$ номинального, предельно допустимое установившееся отклонение допускается до $\pm 10\%$ у электроприемников [3].

Потери напряжения не должны превышать в электрических сетях 10 кВ – 10 %, в электрических сетях 0,38/0,22 кВ – 8 %, в электропроводах одноэтажных жилых домов – 1 %, в электропроводах зданий, сооружений, двух- и многоэтажных жилых домов – 2 % [4].

Таким образом, схема электроснабжения напряжением 10 кВ коттежных поселков позволит:

- уменьшить потери мощности и электроэнергии в сетях 0,4 кВ;
- повысить надежность электроснабжения потребителей;
- улучшить показатели качества электроэнергии (в том числе сертифицируемый показатель – установившееся отклонение напряжения).

Проведено сравнение показателей электропотребления для различных вариантов схем электроснабжения 15 коттеджей. Максимальная мощность одного коттеджа принята равной 15 кВт, расчетная мощность одного коттеджа – 5,5 кВт, $\cos\varphi$ – 0,997. Расчет проведен в программном комплексе «Энергия». Рассмотрены 3 варианта схем электроснабжения:

- распределительная сеть напряжением 0,38 кВ;
 - распределительная сеть напряжением 10 кВ, тупиковая;
 - распределительная сеть напряжением 10 кВ, транзитная.
- Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Потери мощности в сравниваемых вариантах схем электроснабжения

№ варианта	$\Sigma P_{\text{нагр}}$, кВт	$\Sigma Q_{\text{нагр}}$, квар	$\Sigma \Delta P$, кВт	$\Sigma \Delta Q$, квар	ΔP_t , кВт	ΔQ_t , квар	ΔP_l , кВт	ΔQ_l , квар
1	82,5	6,83	7,592	9,84	0,492	1,22	7,1	8,62
2			1,225	1,11	0,707	1,09	0,518	0,024
3			1,223	1,11	0,707	1,09	0,515	0,020

Таблица 2. Потери напряжения в сравниваемых вариантах схем электроснабжения

№ варианта	Напряжение в питающей сети, кВ	Напряжение на вторичной обмотке тр-ра, кВ	Напряжение на ВРУ первого дома, кВ	Напряжение на ВРУ последнего дома, кВ
1	10,5	0,417	0,390	0,370
2	10	0,396	0,394	0,394
3	10	0,396	0,394	0,394

Из табл. 1 видно, что потери активной мощности в схеме с питающим напряжением 0,38 кВ выше в 6 раз потерь в схемах с питающим напряжением 10 кВ. При этом потери в обеих схемах с питающим напряжением 10 кВ практически одинаковые.

Из табл. 2 видно, что в схеме с напряжением 0,38 кВ напряжение на вводно-распределительном устройстве (ВРУ) первого дома составляет 390 В, а напряжение на ВРУ последнего дома составляет 370 В. Разница между напряжениями домов равняется 20 В. В случае снижения напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора до 400 В напряжение на ВРУ первого дома составит 370 В, а напряжение на ВРУ последнего дома составит 350 В. В схемах с напряжением 10 кВ напряжения на ВРУ всех домов имеют одинаковое значение, равное 394 В.

Литература

1. **Тульчин И.К.**, Нудлер Г.И. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 480 с.: ил.
2. **Нормативы** для определения расчетных электрических нагрузок зданий (квартир), коттеджей, микрорайонов (кварталов) застройки и элементов городской распределительной сети. Изменения и дополнения раздела 2 "Расчетные электрические нагрузки" Инструкции по проектированию городских электрических сетей РД 34.20.185-94.
3. **ГОСТ 13109-97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1997.
4. **Нормы** технологического проектирования электрических сетей сельскохозяйственного назначения.

УДК 621.311

С.В. БАЛДОВ, ст. преподаватель
А.А. ШУЛЬПИН, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Выявление и анализ факторов, влияющих на электропотребление основного и вспомогательного электрооборудования прядильно-ткацких предприятий

Проведение работ по энергосбережению, повышению энергетической эффективности, технико-экономическому обоснованию предложенных энергосберегающих мероприятий невозможно без знания факторов и оценки их влияния на электропотребление основного и вспомогательного технологического оборудования, осветительных установок, вентиляционных систем и систем микроклимата.

Анализ проводимых работ по обязательному энергетическому обследованию промышленных предприятий показывает, что данные работы могут быть использованы в большинстве случаев только для оценки общей динамики изменения потребления электрической энергии, но ни как не для разработки мероприятий по энергосбережению.

В большинстве случаев фактические балансы электрической энергии по отдельным производственным объектам отсутствуют, не говоря уже про разделение их по отдельным статьям расходов и технологическим агрегатам.

При этом даже наличие необходимых фактических балансов не позволяет проводить работы по выявлению мест нерационального расхода электрической энергии в связи с отсутствием обоснованных норм расхода электрической энергии на выполнение различных технологических операций, вспомогательные нужды и другое.

В качестве объекта исследования были рассмотрены прядильно-ткацкие предприятия текстильной отрасли промышленности.

Задача проведенного исследования выявление различных факторов для получения норм электропотребления, как контролируемых, так и контролируемых неуправляемых, и оценка их влияния на электропотребление основным и вспомогательным технологическим оборудованием, осветительными установками, вентиляционными системами и системами микроклимата.

Для решения данной задачи были проведены как активные эксперименты, так и пассивные эксперименты на действующем оборудовании нескольких текстильных предприятий Ивановской области.

Анализ литературных источников [1-3] позволил наметить основные факторы, влияющие на электропотребление и представленные в табл. 1.

В результате проведенных исследований на основе активных и пассивных экспериментов были получены основные факторы, в зависимости от которых должны определяться индивидуальные нормы потребления электрической энергии (табл. 2) и основные регрессионные модели для оценки степени влияния отдельных факторов на электропотребление.

При проведении пассивных экспериментов для установления средних значений потребления мощности технологическим оборудованием при учете влияния факторов, приведенных в табл. 2 для технологического оборудования, происходит постепенное уменьшение величины разброса потребляемой мощности.

Однако оставшийся разброс потребляемых мощностей технологическим оборудованием, имеющим одинаковые технологические параметры, может быть объяснен только различным техническим состоянием электрической и механической части данного оборудования.

Таблица 1. Основные факторы, влияющие на электропотребление оборудования прядильно-ткацких предприятий

Вид оборудования	Основные факторы, влияющие на электропотребление
Пневмопрядильные машины	<ul style="list-style-type: none"> - общее количество прядильных камер; - частота вращения прядильных камер; - частота расчесывающих валиков; - крутка на 1 метр; - количество прядильных камер в работе; - линейная плотность пряжи; - напряжение питающей сети.
Ткацкие станки	<ul style="list-style-type: none"> - частота вращения главного вала станка; - состав ткани (хлопок, шерсть, лен, и т.д.); - линейной плотности ткани по утку; - линейной плотности ткани по основе; - напряжение питающей сети.
Чесальные машины	<ul style="list-style-type: none"> -линейная скорость выпуска ленты; - линейная плотность ленты; - коэффициент полезного времени машины.
Ленточные машины	<ul style="list-style-type: none"> - состав ленты; - частота вращения 1-го вытяжного цилиндра; - частота вращения 2-го вытяжного цилиндра; - частота вращения 3-го вытяжного цилиндра; - общая скорость ленточной машины.
Осветительные установки	<ul style="list-style-type: none"> - установленная мощность осветительного оборудования; - напряжение сети, питающей осветительную установку; - количество работающего технологического оборудования.
Вентиляционные системы и системы микроклимата	<ul style="list-style-type: none"> – мощность установленного вентиляционного оборудования; – погодно-климатические условия.

Таблица 2. Основные факторы, влияющие на электропотребление оборудования прядильно-ткацких предприятий по результатам проведенного исследования

Вид оборудования	Основные факторы, влияющие на электропотребление, по результатам исследования
Пневмопрядильные машины	<ul style="list-style-type: none"> - тип машины; - ассортимент; - частота вращения прядильных камер; - диаметр прядильных камер.
Ткацкие станки	<ul style="list-style-type: none"> - тип станка; - ассортимент; - скорость вращения.
Чесальные машины	<ul style="list-style-type: none"> - тип машины; - ассортимент.
Ленточные машины	<ul style="list-style-type: none"> - тип машины; - ассортимент.
Осветительные установки	<ul style="list-style-type: none"> - установленная мощность осветительного оборудования; - напряжение сети, питающей осветительную установку; - количество работающего технологического оборудования.
Вентиляционные системы и системы микроклимата	<ul style="list-style-type: none"> – мощность установленного вентиляционного оборудования

Полученные результаты могут быть использованы для установления экономически обоснованных норм расхода электрической энергии для основного и вспомогательного технологического оборудования, осветительных установок, вентиляционных систем и систем микроклимата для прядильно-ткацких предприятий.

Литература

1. **Красник В.В.** Повышение экономичности работы электрооборудования на предприятиях легкой промышленности. – М.: Легпромбытиздат, 1985.
2. **Иванов А.М.**, Лебедев А.М. Рациональное использование электроэнергии на предприятиях легкой промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1972.
3. **Шмелев А.Н.**, Шишло К.С. Электрооборудование текстильных предприятий. – М.: Легкая индустрия, 1968.

УДК 621.311

С.В. БАЛДОВ, ст. преподаватель
А.А. ШУЛЬПИН, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Разработка нормализованных электробалансов для прядильно-ткацких предприятий

Повышение эффективности использования электрической энергии является одной из приоритетных задач в области энергосбережения [1].

В качестве объекта исследования рассмотрены прядильно-ткацкие предприятия текстильной отрасли промышленности.

Для повышения конкурентоспособности текстильной продукции на внутреннем рынке необходимо снижение себестоимости её производства. Одной из весомых составляющих себестоимости данной продукции является расход электрической энергии на производство готовой продукции.

Текстильные предприятия в настоящее время находятся в достаточно тяжелых условиях, поэтому выявление мест нерационального расхода электрической энергии является одним из направлений по снижению себестоимости производимой продукции.

Проведенный анализ на нескольких прядильно-ткацких предприятиях Ивановской области позволяет сделать выводы об отсутствии налаженной системы технического учета электрической энергии, отсутствии технически и экономически обоснованных норм расхода электрической энергии.

Проведенные исследования показывают, что на текстильных предприятиях в настоящее время установлено новое оборудование, доля которого составляет около 10–20 % от общего объема технологи-

ческого оборудования. Использование существующих норм для нового технологического оборудования приводит к завышению нормализованных балансов, что сводит на нет работы по выявлению мест нерационального использования электрической энергии. Однако применение существующих удельных норм невозможно и для существующего технологического оборудования в связи с выработкой им своего ресурса.

Получение нормализованных балансов электропотребления и сравнение их с фактическими, позволяет оценить возможные ресурсы по экономии электрической энергии, а также наметить пути повышения эффективности электропотребления [2].

Исследования показывают, что для проведения эффективной политики по электросбережению нормализованные балансы должны быть получены для каждого уровня иерархической структуры предприятия, причём эффективность повышается при уменьшении интервала времени составления данного баланса.

Оптимальным является составление нормализованных электробалансов для каждой рабочей смены. Это связано с тем, что в большинстве своём контроль выработки продукции, время работы и другие показатели использования технологического и прочего оборудования производится в конце работы смены. Использование этих данных позволяет составлять нормализованные электробалансы без дополнительных трудозатрат.

Увеличение временного периода составления нормализованных электробалансов приводит к снижению эффективности проведения мероприятий по повышению эффективности электропотребления из-за увеличения влияния различных независимых неконтролируемых факторов на электропотребление.

Уменьшение временного интервала составления нормализованных электробалансов приводит к существенному увеличению объема обрабатываемой информации, что в свою очередь вызывает большие издержки на получение и обработку исходной информации.

Ранее для составления нормализованных электробалансов использовались временные отраслевые нормы [3]. Однако применение данных норм в современных условиях затрудняется следующими факторами:

- нормы устарели и не могут быть распространены на вновь устанавливаемое оборудование;
- для существующего технологического оборудования, большей частью выработавшего свой ресурс, данные нормы неприменимы;
- в настоящее время какие-либо из операций по обработке и выпуску тканей и пряжи могут отсутствовать;
- отсутствует возможность выделения расходов на вентиляцию и освещение;
- система учета очень часто не позволяет разделять электропотребление по различным подразделениям, а также статьям расхода;

- нормы в большинстве своём приведены на единицу готовой продукции;
- в качестве периода составления нормализованных балансов рассматривается в большинстве случаев календарный год (в лучшем случае квартал).

Исходя из вышесказанного, была разработана методика составления нормализованных электробалансов на различных ступенях иерархической структуры текстильного предприятия.

Основные особенности методики:

- нормы определяются отдельно по статьям расходов: технология, вентиляция, освещение, субабоненты, потери;
- нормы определяются для каждого уровня иерархической структуры предприятия;
- нормы определяются в именованных единицах (кВт·ч), что позволяет учесть фактическое время работы технологического оборудования, в том числе и на холостом ходу;
- в качестве временного периода нормирования рассматривается рабочая смена.

Данный подход составления нормализованных электробалансов был использован для участка ткацкого производства, на электрооборудовании которого были произведены фактические измерения электропотребления.

Результаты сравнения фактических и нормализованных балансов, полученных с использованием положений разработанной методики, приведены в табл. 1 и 2 для технологического оборудования и освещения.

При этом нормализованные балансы электропотребления получены для фактического состояния оборудования и системы электроснабжения, что позволяет произвести оценку возможности использования разработанной методики для нормирования.

Как видно из табл. 1 и 2 нормализованный расход электрической энергии на технологические нужды относительного фактического значения находится в диапазоне от 1,27 % до 4,19 %, а нормализованный расход электрической энергии на освещение в диапазоне от 9,67 % до 10,12 %.

Точность полученных нормализованных электробалансов определяться в первую очередь точностью исходных данных, таких как фактическая выработка для технологического оборудования и напряжение на зажимах осветительной установки для освещения.

Таблица 1. Результаты сравнения фактических и нормализованных электробалансов для технологического оборудования

Дата, время	$W_{\text{факт}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$W_{\text{норм}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$\frac{W_{\text{норм}} - W_{\text{факт}}}{W_{\text{факт}}} 100, \%$
23.09.2009 вечер	430,71	442,21	2,67
23.09.2009 ночь	376,24	386,93	2,84
24.09.2009 утро	428,58	442,21	3,18
24.09.2009 вечер	429,6	442,21	2,93
24.09.2009 ночь	375,48	386,93	3,05
25.09.2009 утро	427,01	442,21	3,56
25.09.2009 вечер	423,32	437,15	3,27
25.09.2009 ночь	363,41	376,69	3,65
26.09.2009 утро	429,88	439,65	2,27
26.09.2009 вечер	431,88	442,21	2,39
26.09.2009 ночь	378,28	386,93	2,29
27.09.2009 утро	427,9	442,21	3,35
27.09.2009 вечер	428,16	438,37	2,38
27.09.2009 ночь	368,94	384,4	4,19
28.09.2009 утро	358,69	363,99	1,48
28.09.2009 вечер	353,61	360,15	1,85
28.09.2009 ночь	313,34	318,49	1,64
29.09.2009 утро	341,72	351,08	2,74
29.09.2009 вечер	359,42	363,99	1,27
29.09.2009 ночь	310,29	314,45	1,34
ИТОГО	7756,46	7962,46	2,66

Таблица 2. Результаты сравнения фактических и нормализованных балансов для освещения

Дата, смена	$W_{\text{факт}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$W_{\text{норм}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$\frac{W_{\text{норм}} - W_{\text{факт}}}{W_{\text{факт}}} 100, \%$
16.09.2009, вечер	244	256	5,10
16.09.2009, ночь	236	255	8,17
17.09.2009, утро	243	258	6,34
17.09.2009, вечер	242	261	7,87
17.09.2009, ночь	236	260	10,12
18.09.2009, утро	245	253	3,45
18.09.2009, вечер	247	247	-0,33
18.09.2009, ночь	247	236	-4,33
19.09.2009, утро	241	244	1,31
19.09.2009, вечер	240	220	-8,28
19.09.2009, ночь	240	217	-9,67
20.09.2009, утро	238	223	-6,18
20.09.2009, вечер	237	222	-6,42
20.09.2009, ночь	227	233	2,44

Окончание табл. 2.

Дата, смена	$W_{\text{факт}}$, кВт*ч	$W_{\text{норм}}$, кВт*ч	$\frac{W_{\text{норм}} - W_{\text{факт}}}{W_{\text{факт}}} 100, \%$
21.09.2009, утро	237	229	-3,62
21.09.2009, вечер	235	230	-2,22
21.09.2009, ночь	226	238	5,46
ИТОГО	4060	4081	0,52

Для определения резервов экономии электрической энергии были выполнены расчеты при условии доведения электропотребления отдельных технологических агрегатов до среднего и минимального уровней, характерных для данного технологического агрегата при заданных параметрах заправки с учетом оптимизации схем электроснабжения и управления системами освещения и вентиляции и микроклимата. Данные результатов расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Оценка возможных объемов экономии электрической энергии

№	Производство	Объем экономии, % от общего потребления ЭЭ	
		при среднем уровне	при минимальном уровне
1	Ткацкие производства	7,2	10,3
2	Прядильные производства	5,1	8,3

Вывод

Разработанная методика составления нормализованных балансов по отдельным статьям расходов электрической энергии и отдельным структурным уровням производства позволяет оценить резервы экономии электрической энергии и наметить мероприятия по повышению эффективности электропотребления.

Литература

1. **Федеральный** закон РФ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №261-ФЗ от 23 ноября 2009г.
2. **Гофман И. В.** Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий. – М. Л.: «Энергия», 1966.
3. **Методические** указания по нормированию расхода тепловой и электрической энергии на предприятиях легкой промышленности. – М.: ЦНИИТЭИлепром, 1984.

В.К. СЛЫШАЛОВ, д.т.н, профессор
(ИГЭУ) г. Иваново,
Ю.В. КАНДАЛОВ, к.т.н.
ОАО «СО ЕЭС» Ивановское РДУ

Математическая модель электрического поля и распределения зарядов в трубопроводном потоке слабопроводящей диэлектрической жидкости

Технологические операции налива, перекачки, перемешивания, слива и т.д., выполняемые над жидкими диэлектриками с высоким удельным сопротивлением, сопровождаются в ряде случаев электризацией последних, что, в свою очередь, приводит к искрообразованию и возникновению пожаров и взрывов. В этой связи становятся актуальными оценки условий искрообразования, возникновения поверхностных и объемных разрядов, обусловленных зарядами статического электричества, выносимых потоками диэлектрических жидкостей в различные участки трубопроводных систем. Постановку задачи о переносе зарядов статического электричества и расчете создаваемого ими электрического поля в потоке слабопроводящей диэлектрической жидкости плоскостей поясняет рис. 1.

Обозначенный на рис. 1 цифрой 1 резервуар является одним из важнейших элементов систем топливоснабжения, в котором протекает процесс релаксации зарядов статического электричества. Для любого элементарного объема в нем, согласно закону непрерывности для плотности полного тока, можем записать:

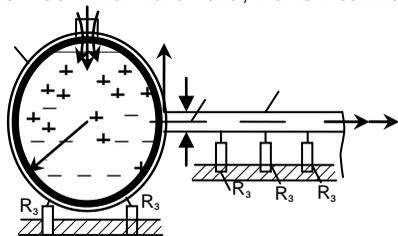


Рис. 1.

1 – резервуар (релаксационная емкость),
2 – трубопровод, R_3 – сопротивления системы заземления, r, x – оси цилиндрической системы координат

$$\operatorname{div} \left(\gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0, \quad (1)$$

где \vec{E} – вектор напряженности электрического поля,
 \vec{D} – вектор электрического смещения, γ – удельная объемная проводимость. С учетом постулата Максвелла $\operatorname{div} \vec{D} = \operatorname{div}_0 e \vec{E} = r$ (ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, ρ – плотность объемных зарядов) из (1) получаем для

распределения $\rho(x, y, z, t)$ формулу:

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0(x, y, z, 0) e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} t}, \quad (2)$$

описывающую процесс релаксации зарядов в объеме резервуара.

Постоянная времени этого процесса $\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\gamma}$ для нефтепродуктов ($\gamma \approx 10^{-14} \div 10^{-12}$ 1/ом·м, $\varepsilon = 2 \div 4$) имеет порядок $\sim 10^3$ с.

Поскольку релаксация объемных зарядов и заряда резервуара в целом $q(t) = \rho(x, y, z, t) \cdot V_p$ (V_p – объем резервуара) физически осуществляется за счет тока в заземлении $i_3(t)$ для потенциала резервуара получаем оценочное значение:

$$\varphi_p(t) = i_3(t) R_{3Э} = -R_{3Э} \frac{dq(t)}{dt} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \rho_0(t) e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} t} \cdot R_{3Э} V_p, \quad (3)$$

где $R_{3Э}$ – эквивалентное сопротивление системы заземления резервуара и контактирующих с ним трубопроводов. Потенциал $\varphi_p(t)$ в расчетах может быть принят согласно (3) равным нулю.

Это, однако, не означает, что близок к нулю потенциал $\varphi(r, x)|_{x=0} = \varphi_0(r)$ во входном сечении трубопровода 2 (рис. 1). Для его определения обратимся к решению известной задачи об электрическом поле диафрагмы – плоскости с круговым вырезом (рис. 2), помещенной в равномерное поле с напряженностью E_0 [2].

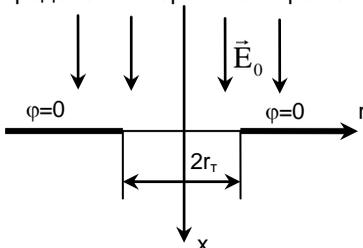


Рис. 2. К расчету электрического поля вблизи входного сечения трубопровода

В условиях решаемой задачи, когда радиусы резервуара и трубопровода соотносятся согласно неравенству $r_0 \gg r_T$, допустимо воспользоваться результатом [2] записав его в координатах r, x , приведенных на рис. 2.

В условиях решаемой задачи, когда радиусы резервуара и трубопровода соотносятся согласно неравенству $r_0 \gg r_T$, допустимо воспользоваться результатом [2] записав его в координатах r, x , приведенных на рис. 2.

В плоскости $x=0$ имеем:

$$\varphi|_{x=0} = \varphi_0(0, r) = \frac{r_m E_0}{\pi} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad 0 < r < r_T. \quad (4)$$

Эта формула будет справедлива и для резервуара любой формы, характеристический размер которого $d \gg r_T$.

Перейдем к рассмотрению электрического поля в трубопроводе. Основным уравнением этой задачи является уравнение Пуассона:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = - \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \rho_0 (r, x) e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} t}, \quad 0 \leq x \leq \ell, \quad 0 \leq r \leq r_T, \quad (5)$$

в котором значения пространственных переменных x , r и времени t связывает закон движения частиц жидкости. Оценка по критерию Рейнольдса, базирующаяся на данных о скоростях прокачки топлива [1], позволяет считать поток в трубопроводе турбулентным с продольной скоростью V_x , величина которой определяется интенсивностью прокачки. Соответственно, в уравнении (5) заменяем $t = \frac{x}{V_x}$. Таким образом необходимо решить уравнение:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = - \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \rho_0 (r, 0) e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \frac{x}{V_x}}, \quad 0 \leq x \leq \ell, \quad 0 \leq r \leq r_T, \quad (6)$$

Граничные условия для этого уравнения имеют вид: на поверхности трубы согласно (3) следует принять

$$\varphi(r, x) \Big|_{r=r_0} = \varphi_0(r_0, x) = 0, \quad 0 \leq x \leq \ell; \quad (7)$$

во входном сечении согласно (4)

$$\varphi_m(r, x) \Big|_{x=0} = \varphi(r, 0) = \frac{r_m E_0}{\pi} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right) \right]^{1/2}, \quad 0 \leq r \leq r_T. \quad (8)$$

В выходном сечении вид функции $\varphi_m(r, \ell)$ определяет режим слива (свободная струя, контактный слив в емкость и т.д.). В любом случае имеет место следующее предельное условие:

$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} \varphi_0(r, \ell) = 0, \quad 0 \leq r \leq r_T, \quad (9)$$

т.е. при достаточно большой длине трубы завершается релаксация объемных зарядов и $\lim_{\ell \rightarrow \infty} \varphi(\ell) = 0$.

Решение уравнения (6) при краевых условиях (7)-(9) представим в форме суммы частных решений [3, 4]:

$$\varphi(r, x) = \sum_{k>1}^{\infty} \varphi_k(x) J_0 \left(j_{0k} \frac{r}{r_0} \right), \quad (10)$$

где $J_0(r)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, а j_{0k} – положительные корни уравнения $J_0(r) = 0$. Это решение удовлетворяет условию (7), а для получения уравнений относительно $\varphi_k(x)$, умножаем (10) на $J_0 \left(j_{0k} \frac{r}{r_0} \right)$ и интегрируем от 0 до r_0 . В итоге этого преобразования [3, 4] получаем следующее уравнение:

$$\frac{d^2 \varphi_k}{dx^2} - \left(\frac{j_{0k}}{r_0} \right)^2 \varphi_k(x) = -\frac{\rho_0}{\varepsilon_0 \varepsilon} \cdot \frac{2}{j_{0k} J_1(j_{0k})} e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \frac{x}{V}}, \quad k=1, 2, \dots \quad (11)$$

где $J_1(j_{0k})$ – функция Бесселя первого рода, первого порядка.

Аналогичным образом должны быть преобразованы условия (8) и (9). Условие (8), в частности, приобретает вид:

$$\varphi_k(0) = \frac{2}{J_1^2(j_{0k})} \int_0^1 \varphi_0 \left(0, \frac{r}{r_0} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right) J_0 \left(j_{0k} \frac{r}{r_0} \right) d \left(\frac{r}{r_0} \right), \quad (12)$$

причем функция $\varphi_0(0, r)$ задается выражением (8). Решение уравнения (11) согласно [5] получаем в форме:

$$\varphi_k(x) = -\frac{a_k}{\mu_k^2 - \alpha^2} e^{-\alpha x} + C_k \operatorname{ch} \mu_k x + D_k \operatorname{sh} \mu_k x, \quad (13)$$

где $\mu_k^2 = \left(\frac{j_{0k}}{r_0} \right)^2$, $a_k = -\frac{\rho_0}{\varepsilon_0 \varepsilon} \cdot \frac{2}{j_{0k} J_1(j_{0k})}$; $\alpha = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \cdot \frac{1}{v_x}$ (14)

Постоянные C_k, D_k находим по условиям (12) и (9). Имеем:

$$C_k = \varphi_k(0) + \frac{a_k}{\mu_k^2 - \alpha^2} \quad (15)$$

При $x = \ell$ значение $\varphi_k(\ell)$ находится по формуле (12), в которой следует заменить $\varphi_m(0, r)$ на $\varphi_m(\ell, r)$. В случае, когда $\ell \rightarrow \infty$, выполняется условие (9) и имеем $D_k = -C_k$. Следовательно при достаточно больших значениях ℓ получаем:

$$\varphi_k(x) \approx -\frac{a_k}{\mu_k^2 - \alpha^2} e^{-\alpha x}, \quad (16)$$

т.е. распределение потенциала по длине трубы перестает зависеть от его распределения во входном сечении $\varphi_k(0)$ и вычисляется по формуле (16).

Дальнейший расчет распределения потенциала – функции $\varphi(r, x)$ выполняется путем суммирования частных распределений $\varphi_k(x) J_0 \left(j_{0k} \frac{r}{r_0} \right)$ в согласии с выражением (10).

Литература

1. **Максимов Б.К.** Нейтрализация зарядов статического электричества в авиационном топливе. / Б.К. Максимов, Обух А.А., Ануров В.М., Кухтерин Е.И.// Электричество, №2, 1973. – С.72-74.
2. **Смайт В.** Электростатика и электродинамика. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954.
3. **Гринберг Г.А.** Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М-Л.: Изд. АН СССР, 1948.

4. Методы расчета электростатических полей/ Н.Н. Миролубов [и др.]. – М.: Высш. школа, 1963.
5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1965.

УДК 621.316.926

Е.С. ЗАЙЦЕВ, аспирант,
В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Система мониторинга пропускной способности высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Предел передаваемой мощности (пропускная способность) по кабельным линиям (КЛ) в первую очередь ограничивается тепловым режимом работы линии. При превышении температуры кабеля в рабочем режиме 90°C в изоляции из сшитого полиэтилена начинают происходить необратимые процессы разрушения и старения, которые приводят к резкому сокращению срока службы кабеля и вызывают пробой изоляции.

Пропускная способность КЛ зависит от большего количества параметров. Часть из них можно определить по аналитическим или эмпирическим формулам на стадии проектирования, однако, факторы, которые определяют внешние условия окружающей среды, учесть сложно. В результате на практике реальный допустимый ток нагрузки кабелей, обусловленный фактическим температурным режимом, может сильно отличаться от рассчитанного на стадии проектирования [1].

На сегодняшний день эту проблему пытаются решить с помощью оптоволоконных средств мониторинга распределённой температуры в режиме реального времени, которые позволяют определять температурный профиль кабелей как функцию времени [2].

Но, так как оптоволоконный датчик возможно разместить только на поверхности кабеля (в лучшем случае в экране, если его внедрять на стадии производства), то невозможно получить температуру наиболее нагретых слоев изоляции вблизи жилы. На рис. 1,а показаны способы размещения оптических датчиков в конструкции кабельных линий, а на рис. 1,б – результаты расчета распределения температуры по сечению одножильного кабеля в установившемся режиме.

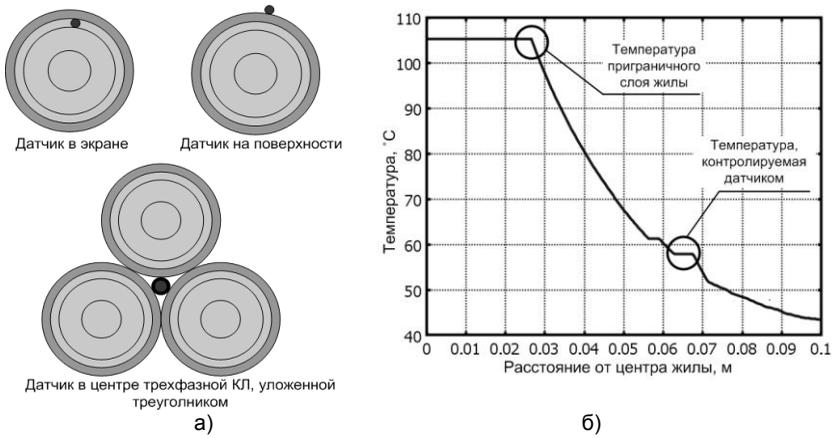


Рис. 1. а) – варианты расположение оптического датчика; б) – распределение температуры по сечению одножильного кабеля

Как видно по рисункам, контролируемая таким образом температура сильно отличается от температуры жилы кабеля. Переменные же нагрузочные режимы кабелей приводят к существенной нестационарности процесса и появлению неконтролируемой методической погрешности [3].

Кроме того, для выполнения превентивных мер по созданию оптимальных токовых нагрузок КЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий, необходимо прогнозирование изменения температуры кабеля. Для этого требуется динамический расчёт температурного поля в сечении кабельной линии в режиме реального времени, в котором будет учитываться текущая токовая нагрузка жил и наведенные токи в экранах.

Путём к решению указанных проблем, по мнению авторов, является комбинированное использование средств измерения распределенной температуры поверхности кабелей, математического моделирования и средств измерения величин токов в жилах и в металлических оболочках кабелей. Это, по сути, является созданием системы мониторинга пропускной способности высоковольтных кабельных линий (ВКЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

Упрощенная схема работы указанной системы представлена на рис. 2.

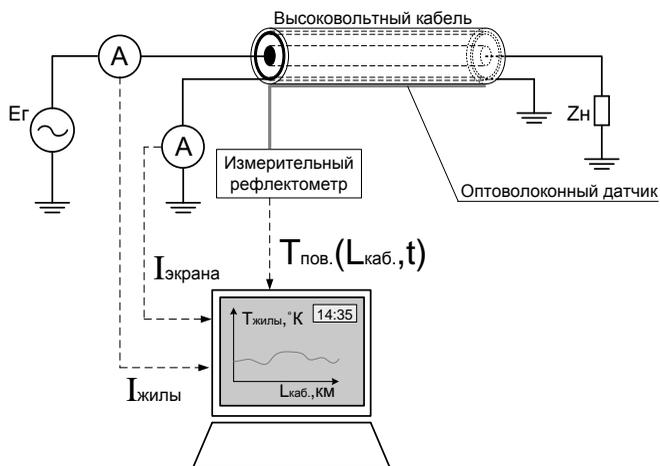


Рис. 2. Упрощенная схема работы системы мониторинга пропускной способности ВКЛ с изоляцией из СПЭ

Принцип работы предлагаемой системы заключается в следующем:

1) оптоволоконные средства измерения распределённой температуры производят измерение температурного профиля кабелей с частотой один раз в минуту, получая среднее значения температур участков кабелей длиной 1 м;

2) одновременно с каждым измерением профилей температур регистрируются значения токов в металлических частях конструкции кабелей;

3) на основе измеренных величин и данных о конструкции кабельной линии производится динамический расчёт локальных температур жил кабелей в режиме реального времени, а также прогнозирование изменения этой температуры на определённое время в будущем;

4) путем сравнения рассчитанных величин локальных температур с допустимым значением температуры изоляции кабелей происходит определение текущей и будущей степени загрузки кабелей.

Реализация такой системы позволит контролировать фактическую пропускную способность кабелей в режиме реального времени, на основе чего будет возможно оптимизировать нагрузку КЛ. Кроме того, на основе прогноза изменения температурного профиля жилы, можно будет оперативно реагировать на перегрев изоляции кабелей, и таким образом снизить вероятность наступления аварийных событий.

Литература

1. **Лавров Ю.А.** Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности. / Ю.А. Лавров // Новости электротехники. – 2006. – № 6.
2. **Ларин Ю.Т.,** Смирнов Ю.В., Гринштейн М.Л. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля / Ю.Т. Ларин, Ю.В. Смирнов, М.Л. Гринштейн // Кабель-news. – 2008. – № 8.
3. **Осика Л.К.** Способы учета изменения температуры по трассам линий электропередачи для уточнения их математических моделей / Л.К. Осика // Электро. – 2006. – № 6.

УДК 621.321

Т.Ю. ВИНОКУРОВА, магистрант
(ИГЭУ) г. Иваново

Схема замещения для расчета минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ

Введение. В компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ промышленного и городского электроснабжения для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) наиболее широкое применение получили устройства, основанные на использовании высших гармоник (ВГ) в диапазоне частот 150ч650 Гц. Условия применимости и, соответственно, область применения указанных устройств защиты от ОЗЗ определяются минимальным уровнем ВГ в токе ОЗЗ. Поэтому оценка минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ для определения чувствительности рассматриваемых устройств защиты актуальна.

Основные параметры компенсированных кабельных 6-10 кВ, влияющие на уровень ВГ в токе ОЗЗ. Анализ статистических данных показал, что на понизительных подстанциях напряжением 110/6-10 кВ, являющихся центрами питания (ЦП) в кабельных сетях 6-10 кВ систем электроснабжения многих отраслей промышленности, как правило, применяются трехобмоточные трансформаторы или трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения мощностью от 40 до 100 МВА, а значения суммарных емкостных токов $I_{C\Sigma}$, питаемых от них сетей, находятся в пределах от 20-30 до 100 А (табл. 1), соотношение мощности питающего трансформатора и трансформаторов нагрузки $S = 0,7ч1,5$, коэффициент загрузки трансформаторов приемных подстанций $K_3 = 0,6ч0,8$. Мощность трансформаторов нагрузки 6-10/0,4 кВ, установленных на ТП и РТП, в 90ч95 % случаев находится в пределах 630 – 2500 кВА. В табл. 1 приведено распределение трансформаторов приемных подстанций по мощности, а также диа-

пазоны изменения и средние значения параметров кабельных линий, соединяющих ЦП с ТП и РТП.

Таблица 1. Основные параметры приемных подстанций (ТП, РТП) сетей 6-10 кВ промышленного электроснабжения

Параметр	Номинальная мощность трансформаторов нагрузки $S_{ном_i}$, кВА			
	630	1000	1600	2500
Доля в суммарной мощности трансформаторов нагрузки, %	25	64	7	4
Среднее сечение кабельной линии от ЦП до ТП (РТП), мм ²	70	95	120	150
Длина кабельной линии от ЦП до ТП (РТП), км	0,3 – 2,5	0,3 – 2,5	0,3 – 2,5	0,3 – 2,5
Средняя длина кабельной линии от ЦП до ТП (РТП), км	0,8	0,8	0,8	0,8

С учетом распределения трансформаторов приемных подстанций по мощности схему компенсированной кабельной сети 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ можно представить в виде, показанном на рис. 1, где $m_1 - m_4$ – число параллельных ниток кабелей, $n_1 - n_4$ – число трансформаторов нагрузки с номинальной мощностью $S_{ном} = 630, 100, 1600$ и 2500 кВА соответственно. Как правило, $m_i = n_i$.

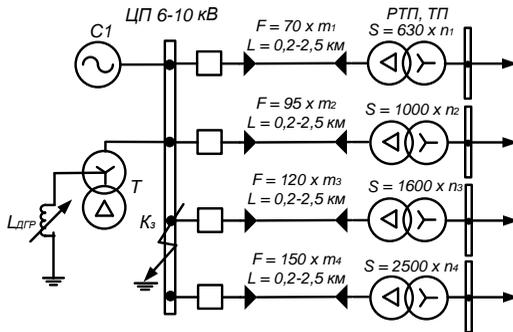


Рис. 1. Схема сети 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

Расчетная схема замещения компенсированной сети 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ. Высшие гармоники, используемые для действия устройств защиты от ОЗЗ ($v = 3 \dots 13$), образуют системы прямой ($v = 7, 13$), обратной ($v = 5, 11$) и нулевой последовательности ($v = 3, 9$). Поэтому расчеты ВГ в токе ОЗЗ удобно выполнять с применением метода симметричных составляющих, позволяющего также просто учитывать различные сопротивления системы, продольных сопротивлений и емкостей линий для прямой (обратной) и

нулевой последовательности. Анализ на математических моделях показал, что в токах намагничивания трехфазных трансформаторов значимыми являются только 5-я и 7-я гармоники [1], при этом уровень ВГ, генерируемых питающим трансформатором, не превышает нескольких процентов от уровня ВГ, генерируемых трансформаторами нагрузки. Уровень ВГ в токе ОЗЗ определяется спектром ВГ напряжения $U_{v\Sigma}$ в месте повреждения и суммарным емкостным током сети $I_{c\Sigma}$. Так как основным источником ВГ являются трансформаторы нагрузки, то значение $U_{v\Sigma}$ будет тем меньше, чем дальше место ОЗЗ от источников ВГ (т.е. чем больше сопротивление линий, связывающих ЦП с ТП и РТП) и чем меньше напряжение на трансформаторах нагрузки, параметр S и сопротивление системы. Приняв, что напряжения на шинах всех РТП и ТП в худшем случае равны минимально допустимому значению, можно представить все линии одной эквивалентной линией.

С учетом изложенного расчетную схему замещения компенсированной сети 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ на шинах ЦП по методу симметричных составляющих можно представить в виде, приведенном на рис. 2.

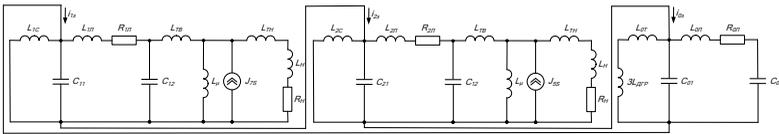


Рис. 2. Комплексная схема замещения для расчета минимального уровня высших гармоник в токе ОЗЗ на шинах ЦП

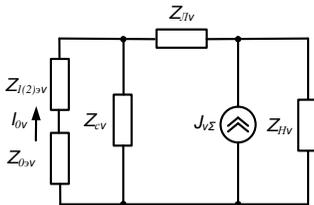


Рис. 3. Упрощенная схема замещения для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ на шинах ЦП

Аналитические расчеты и расчеты на трехфазных моделях сетей 6-10 кВ показали, что без существенного ущерба для точности расчетов в схеме рис. 2 можно пренебречь влиянием на уровень ВГ ДГР, индуктивностей намагничивания и сопротивлений обмоток трансформаторов нагрузки и представить кабельные линии не П-образной, а Г-образной схемой замещения. Эти допущения приво-

дят к погрешности в оценке минимального уровня ВГ не более 10 %, но значительно упрощают схему замещения (рис. 3) и аналитическое решение.

Расчетное выражение для определения v -й гармоники прямой (1) или обратной (2) последовательности в токе ОЗЗ в комплексной форме:

$$I_{cv}^{(1)} = 3I_{0v} = \frac{3 \cdot J_{v\Sigma} \cdot Z_{iv} \cdot Z_{cv}}{(Z_{\dot{e}v} + Z_{iv}) \cdot (Z_{cv} + Z_{1(2)\dot{y}v} + Z_{0\dot{y}v}) + Z_{cv} \cdot (Z_{1(2)\dot{y}v} + Z_{0\dot{y}v})}, \quad (1)$$

где Z_{Hv} , Z_{cv} , Z_{lv} , $Z_{0\dot{a}v}$, $Z_{1(2)\dot{a}v}$ – комплексные сопротивления нагрузки, сети, линии, эквивалентные сопротивления систем нулевой и прямой (обратной) последовательности соответственно, $J_{v\Sigma}$ – ток источника ВГ прямой (обратной) последовательности.

Минимальный уровень ВГ при $I_{c\Sigma} = 25$ А, мощности питающего трансформатора с расщепленной обмоткой НН 40 МВА, $S = 0,7$, $K_3 = 0,7$, определенный по (1), составляет $I_{5\Sigma} \approx 0,6$ % $I_{c\Sigma}$, $I_{7\Sigma} \approx 0,35$ % от $I_{c\Sigma}$. Сравнение результатов указанных расчетов по (1) и расчетов, выполненных в системе Matlab по схеме рис. 1, показало, что погрешности не превышают 10 – 15 %.

Заключение

Предложенная расчетная схема замещения компенсированной сети 6-10 кВ и методика определения ее параметров обеспечивают приемлемую точность оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ.

Литература

1. **Винокурова Т.Ю.** Модели трансформаторов для анализа спектра высших гармоник при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / Т.Ю. Винокурова // Энергетика глазами молодежи: науч. труды III Международной науч.-технич. конф., сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – т. 2. – С. 355-359.

УДК 621.314

Г.А. ФИЛАТОВА, магистрант
(ИГЭУ) г. Иваново

Применение уравнения динамики перемагничивания для моделирования трансформаторов тока нулевой последовательности

Введение. Большая часть электрической энергии распределяется потребителям через сети напряжением 6–10 кВ. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в указанных сетях и часто является первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Поэтому надежность электропитания потребителей в значительной мере зависит от технического совершенства (селективности и устойчивости функционирования) устройств защиты от ОЗЗ, влияющего на затраты времени, связанные с поиском и ликвидацией повреждения. Для обеспечения требуемой высокой чувствительности устройства защиты от ОЗЗ выполняются реагирую-

щими на токи нулевой последовательности $3I_0$ и подключаются к специальным кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП). В отличие от устройств релейной защиты от коротких замыканий (КЗ) в защитах от ОЗЗ в зависимости от режима заземления нейтрали сети в качестве входных воздействующих величин используются не только составляющие промышленной частоты (50 Гц) тока $3I_0$, но и высшие гармонические составляющие (ВГ), а также токи переходных процессов, возникающих в момент пробоя изоляции фазы сети на землю.

Вопросы работы существующих исполнений ТТНП (ТЗЛМ, ТЗРЛ и др.) на ВГ и в переходных режимах, особенно при больших вторичных нагрузках, характерных для ряда выпускаемых промышленностью устройств защиты от ОЗЗ на электромеханической и электронной базе, изучены недостаточно, что может быть дополнительной причиной не всегда высокой эффективности функционирования некоторых широко применяемых в России исполнений устройств защиты от ОЗЗ [1]. Наиболее эффективным методом исследования как динамических, так и статических режимов работы ТТНП является математическое моделирование на ЭВМ. Поэтому разработка математических моделей ТТНП различных типов для исследования статических и динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ является, наш взгляд, актуальной задачей.

Подходы к моделированию ТТНП. В большинстве случаев для построения математической модели нелинейного устройства, содержащего магнитопровод из электротехнической стали, принято использовать основную кривую намагничивания (ОКН). В работах НПИ (в настоящее время ЮРГТУ) показано, что при необходимости максимально точного отображения не только интегральных, но и мгновенных значений вторичного тока, что важно, например, для защит на основе высших гармоник, при моделировании трансформаторов тока необходимо использовать среднюю кривую намагничивания (СКН).

Математическая модель ТТНП на основе ОКН. Точность такой математической модели существенно повышается, если использовать экспериментально снятую ОКН ТТНП. С учетом этого в работе использовалась полученная экспериментально с применением программно-инструментального комплекса NI LabView и источника первичного синусоидального тока ОКН наиболее широко применяемого в защитах от ОЗЗ ТТНП типа ТЗЛМ. Сравнение результатов, полученных экспериментально на реальном ТТНП и на его математической модели, показали, что модель на основе ОКН при работе трансформатора тока в режиме холостого хода обеспечивает приемлемые погрешности (до ~10 %) по интегральным (среднеквадратичным) значениям вторичного напряжения только при работе на линейном участке ОКН ($I_{\text{ТТНП}} = 3 \dots 10 \text{ A}$). При этом погрешности по мгновенным значениям могут значительно превышать 10 %, что обуславливает возможность значительных искажений формы и спектра ВГ вторичного напряжения. Поэтому модель ТТНП на основе ОКН неприемлема для исследования режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ на осно-

ве ВГ или электрических величин переходного процесса, имеющих входное сопротивление по цепям тока, соизмеримое с сопротивлением ветви намагничивания.

Погрешности модели на основе ОКН в статических и динамических режимах значительно уменьшаются при малых вторичных нагрузках ТТНП, характерных для современных устройств релейной защиты на микропроцессорной базе и некоторых реле тока на микроэлектронной базе (например, РТЗ-51).

Математическая модель ТТНП на основе СКН. Основной недостаток данного подхода – необходимость использования семейства СКН, соответствующих различным значениям тока намагничивания. Для построения модели на основе СКН использовались петли гистерезиса магнитопровода ТТНП типа ТЗЛМ, полученные экспериментально с помощью программно-инструментального комплекса NI LabView и источника первичного синусоидального тока

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что модели ТТНП на основе СКН обеспечивают значительное уменьшение как токовых, так и угловых погрешностей по сравнению с моделью на основе ОКН. Следует однако отметить, что с насыщением магнитопровода ТТНП погрешности модели на основе СКН также возрастают. Как и для модели на основе ОКН, уменьшение вторичной нагрузки ТТНП обеспечивает существенное снижение токовой и угловых погрешностей.

Математическая модель ТТНП на основе уравнения динамического перемагничивания магнитопроводов. В основе данной модели лежит уравнения динамики перемагничивания [2]:

$$\frac{dB}{dt} = r \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right) (H(t) - H_{cm}), \quad (1)$$

где H_{cm} – статическая петля гистерезиса.

Так как H_{cm} зависит от амплитуды первичного тока, в модели ТТНП на основе уравнения (1) потери в стали сердечника на гистерезис и вихревые токи приближенно учитывались постоянным активным сопротивлением, подключенным параллельно ветви намагничивания. Такое представление функции H_{cm} дает достаточно точное совпадение петель гистерезиса при значениях первичных токов до 10 А (рис. 1). При этом модель обеспечивает приемлемую погрешность (до 10 %) и для мгновенных значений вторичного напряжения даже при работе ТТНП в режиме холостого хода (рис. 2).

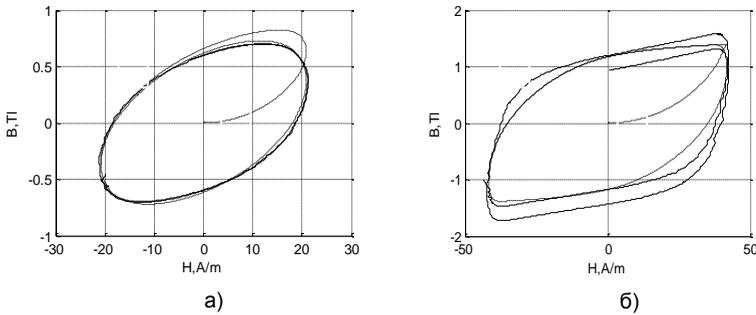


Рис. 1. Сравнение экспериментальных (кривая 1) и расчетных (кривая 2) петель гистерезиса, полученных для моделей ТТП на основе уравнения динамики перемагничивания: а – $I_{ТТПН} = 5 \text{ А}$; б – $I_{ТТПН} = 10 \text{ А}$

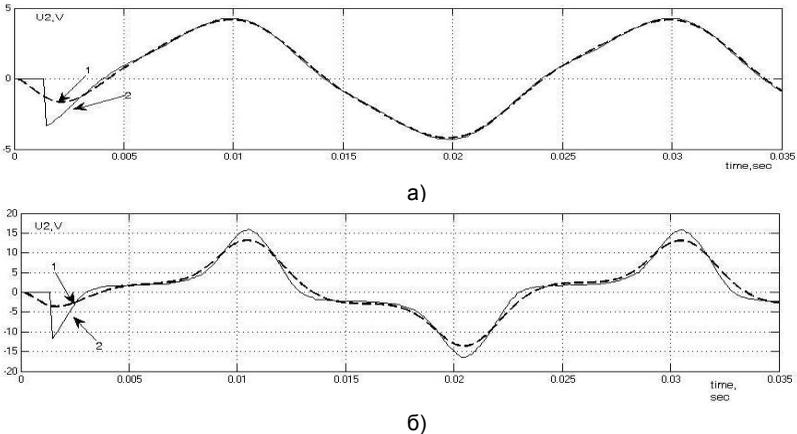


Рис. 2. Сравнение полученных для моделей ТТП расчетных (кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) осциллограмм: а – $I_{ТТПН} = 5 \text{ А}$; б – $I_{ТТПН} = 10 \text{ А}$

Таким образом, применение уравнения динамики перемагничивания (1) для моделирования кабельных ТТП позволяет обеспечить приемлемую точность модели в статических и динамических режимах даже при больших вторичных нагрузках.

Литература

1. **Борухман В.А.** Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6 - 10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию / В.А. Борухман // Энергетик. - 2000. – № 1. – С. 20-22.
2. **Кадочников А.И.** Динамические петли магнитного гистерезиса. – Екатеринбург, 2007.

Алгоритм дистанционной защиты ЛЭП с компенсацией влияния переходного сопротивления

Переходное сопротивление в месте повреждения обычно является активным, однако вносимая им погрешность в измеряемое дистанционной защитой (ДЗ) сопротивление является в общем случае комплексной, так как токи в местах повреждения и установки защиты могут не совпадать по фазе. В отдельных режимах из-за этого возможна неселективная работа, для исключения которой загроубляется уставка и снижается общая чувствительность защиты.

Компенсация влияния переходного сопротивления широко используется при определении расстояния до места повреждения на линиях электропередачи (ОМП ЛЭП). Однако указанная процедура предназначена для устранения возможной причины замыкания, и реализуется уже после отключения линии защитой. Это позволяет использовать в алгоритме ОМП ЛЭП упрощенную модель с коротким замыканием (КЗ) только на рассматриваемой линии. Для ДЗ, которая должна быть селективной, подобный подход неприемлем.

Целью исследования являлся анализ особенностей и преимуществ методов ОМП ЛЭП для совершенствования ДЗ.

Для компенсации влияния переходного сопротивления необходимо измерять напряжение в месте установки защиты тогда, когда ток в переходном сопротивлении I_K переходит через ноль [1]. Чтобы найти его фазу, используется опорный ток $I_{оп}$, причем он выбирается так, чтобы разность фаз β (угол коррекции) между $I_{оп}$ и I_K не зависела от ЭДС в схеме замещения и величины переходного сопротивления. Упрощенно $\beta = 0$. В роли $I_{оп}$ могут выступать функции токов обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей, а также чисто аварийного тока $I_{ав} = I_1 - I_H$, где I_H – ток предшествующего нагрузочного режима. Например, при однофазном замыкании фазы А в качестве $I_{оп}$ могут использоваться непосредственно сами токи $I_{ав}$, I_2 , I_0 .

Рассмотрим работу методики компенсации влияния переходного сопротивления для схемы, изображенной на рис. 1.

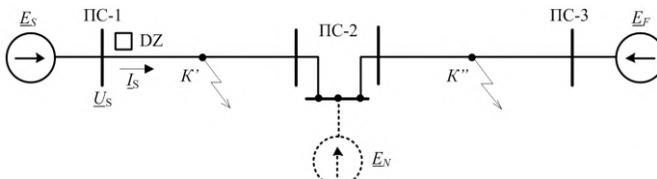


Рис. 1. Моделируемый участок сети

На рис. 2,а показана работа метода при КЗ на защищаемой линии (точка K'). Предположим, что опорный ток строго совпадает с током в месте установки защиты. Отрезок OA представляет собой измеряемое в месте установки защиты сопротивление. Через точку A проведем прямую 1, параллельную опорному току $I_{оп}$. Через точку O проведем прямую 2 под углом φ_L к действительной оси, тогда отрезок OB будет представлять собой сопротивление линии до точки КЗ $Z_{комп}$, а отрезок BA – погрешность $\Delta Z_{пер}$, вносимую переходным сопротивлением. По сути, длина отрезка OB есть расстояние до места повреждения в относительных единицах. Для сравнения на рисунке также приведен отрезок OC , которому соответствует относительная длина защищаемой линии и ее полное сопротивление $Z_{лин}$.

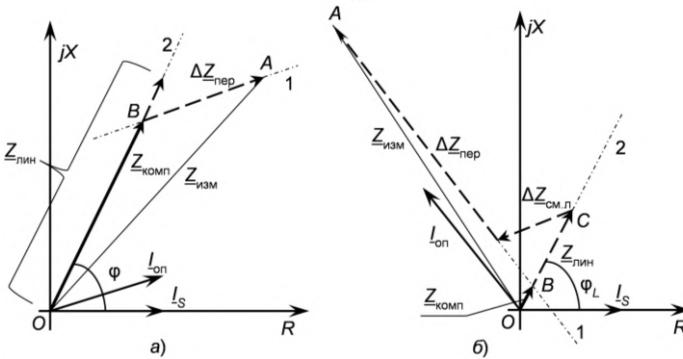


Рис. 2. Работа методики компенсации при КЗ на защищаемой и смежной линиях

При замыкании на смежной линии (рис. 2,б) $\Delta Z_{см.л.}$ неизвестно и не может быть учтено в расчетах. В некоторых случаях отрезок OB может оказаться короче, чем отрезок OC , т.е. измеряемое расстояние до места повреждения $l_{изм}$ будет *меньше* полной длины защищаемой линии. Как правило, конец вектора $Z_{изм}$ при этом находится во втором квадранте, попадание в первый квадрант возникает значительно реже. Более того, иногда точка пересечения прямых 1 и 2 (обозначенная как B) вообще лежит в третьем квадранте (*отрицательное* $l_{изм}$).

Построение алгоритма дистанционной защиты

Отметим, что фаза $Z_{комп}$ всегда будет равна заранее заданному углу φ_L , поэтому сравнивать с уставкой имеет смысл только его модуль (фактически, реализуя защиту, основанную на измерении длины). Как можно видеть, простое сравнение полученной длины с уставкой не позволяет однозначно судить, где находится повреждение: близкая к нулю длина вполне может получиться при замыкании в конце смежной линии.

Однако компенсация переходного сопротивления дает слишком хороший прирост чувствительности, чтобы от нее отказываться. Выходом из подобной ситуации является ее сочетание с другими критериями,

т.е. реализация многомерной защиты. В качестве дополнительных критериев, накладываемых на дистанционный замер, могут выступать следующие:

- 1) несрабатывание в ситуациях, когда $I_{изм} < 0$;
- 2) несрабатывание в ситуациях, когда конец вектора $\underline{Z}_{изм}$ лежит вне первого квадранта;
- 3) отстройка от замыканий за пределами смежных элементов (линий и трансформаторов) с помощью токовой отсечки на одном из «опорных» токов;
- 4) ввод уставки по модулю измеряемого сопротивления $Z_{изм}$, причем ее предлагается вводить по результатам испытаний на имитационной модели рассматриваемого участка сети.

Зависимости переходного сопротивления $R_{кр}$, после которого защита перестает работать, от расстояния до места повреждения l (объектные характеристики [2]), приведены на рис. 3 для классического и разработанного алгоритмов. Они были получены на имитационной модели линии 220 кВ Семеновская – НиГЭС длиной 85 км.

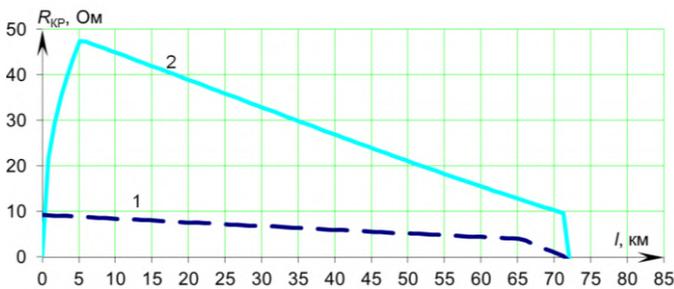


Рис. 3. Объектные характеристики сравниваемых защит:
1 – классический алгоритм, 2 – разработанный

Анализ объектных характеристик показывает, что чувствительность нового алгоритма заметно выше классического. Объясняется это тем, что у него отсутствует жестко заданная уставка по активному сопротивлению, и сопротивление $R_{кр}$, определяется, в основном, дополнительными критериями. Новый алгоритм может найти широкое применение в современных цифровых защитах ЛЭП.

Литература

1. **Аржанников Е.А.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов. — М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. **Лямец Ю.Я.** Объектные характеристики дистанционной защиты / Ю.Я. Лямец, Н.В. Николаева, А.О. Павлов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы II всероссийской научно-технической конференции. — Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1998. — С. 136-140.

Разработка системы мониторинга эффективности передачи электроэнергии

Одним из основных приоритетов внутренней политики России является повышение энергетической эффективности транспорта электроэнергии. С целью создания правовой базы энергосбережения был принят и вступил в силу Федеральный Закон № 261 [1].

Для достижения запланированных результатов все территориальные сетевые организации (ТСО) разрабатывают программы мероприятий по снижению потерь (МСП), эффективность реализации которых определяет общий уровень потерь в сети. При разработке таких программ для каждого запланированного к внедрению мероприятия на этапе расчета определяется плановый эффект, а по итогам реализации мероприятия рассчитывается фактический.

Непрерывный мониторинг хода реализации в ТСО МСП и последующий анализ полученных результатов позволяет обеспечить: комплексную оценку эффективности реализации МСП и эффективности энергопотребления зданиями и сооружениями; выработку рекомендаций для корректировки направлений развития деятельности ТСО по энергосбережению.

Для повышения эффективности передачи электроэнергии систему мониторинга необходимо разделить на четыре этапа: сбор и консолидация информации; анализ ее достоверности; расчет планового и фактического эффекта от реализации МСП; анализ эффективности реализации МСП.

На первом этапе организуются сбор и подготовка исходной информации, необходимой для расчета фактического и планового эффекта от внедрения МСП. Представление исходной информации для расчета необходимо формировать в виде таблиц для каждого мероприятия в отдельности. Ежемесячно собирается информация о потреблении электроэнергии по точкам учета, а также об изменениях в составе оборудования в границах сетей ТСО. Ежегодно подготавливается информация о результатах расчета потерь электроэнергии и об объемах реализации МСП в целом по сетям ТСО.

На втором этапе проводится анализ достоверности полученной исходной информации путем сравнения объемов потребления электроэнергии по точкам учета с предыдущим аналогичным периодом, анализа потерь электроэнергии по уровням напряжения и информации об изменении состава и характеристик режимов работы оборудования.

На третьем этапе рассчитывается плановый эффект для намеченных мероприятий и фактический эффект для МСП, внедренных по итогам

предыдущего периода. Составляются итоговые таблицы МСП и эффектов от их реализации для каждого структурного подразделения ТСО.

На четвертом этапе проводится сравнение фактического эффекта с плановым по всем МСП, реализованным ТСО в базовом периоде. По результатам предыдущего этапа подразделения ТСО ранжируются по эффективности реализации МСП и на основе анализа работы наиболее успешных из них формируются предложения по улучшению работы в отстающих.

Расчет фактического эффекта от внедрения МСП, легитимный для сравнения с определенным ранее плановым эффектом, целесообразно производить на календарный год, следующий за датой внедрения мероприятия. В случае если МСП внедрено в течение неполного календарного года, на который был рассчитан плановый эффект, целесообразно произвести оценочный расчет фактического эффекта от его внедрения с приведением к годовому интервалу.

Оценка фактического эффекта от реализации мероприятия по снижению условно-постоянных потерь на годовом интервале ($\mathcal{E}_{\text{у-п год}}$) производится пропорционально времени работы оборудования:

$$\mathcal{E}_{\text{у-п год}} = \mathcal{E}_{\text{у-п уд}} \cdot T_{\text{год}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{у-п уд}} = \frac{\Delta W}{T_{\text{расч}}}$ – удельное снижение условно-постоянных потерь за

день расчетного периода ($T_{\text{расч}}$), для которого рассчитан фактический эффект (ΔW), тыс. кВт·ч;

$T_{\text{год}}$ – число дней в году, в течение которых реализуется мероприятие, дн.

Определение оценки фактического эффекта от реализации мероприятия по снижению нагрузочных потерь по аналогичному алгоритму некорректно ввиду больших погрешностей, поэтому необходима разработка принципиально иного подхода:

1) Определяется эффект \mathcal{E}_T за период времени T дней, прошедший с момента внедрения мероприятия до конца года, для которого рассчитан плановый эффект.

2) Эффект \mathcal{E}_T разбивается на эффект зимнего периода $\mathcal{E}_{T \text{ зима}}$ и эффект летнего периода $\mathcal{E}_{T \text{ лето}}$. В целом в календарном году пять зимних и семь летних месяцев.

3) Рассчитывается суммарный эффект зимнего и летнего периода на годовом интервале:

$$\mathcal{E}_{\text{зима за год}} = \mathcal{E}_{\text{Тзима}} \cdot \left(\frac{W_{\text{отп. зима год}}}{W_{\text{отп. зима T}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_{\text{зима}}}{T_{\text{зима год}}} \right); \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_{\text{лето за год}} = \mathcal{E}_{T_{\text{лето}}} \cdot \left(\frac{W_{\text{отп. лето год}}}{W_{\text{отп. лето } T}} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_{\text{лето}}}{T_{\text{лето год}}} \right), \quad (3)$$

где $W_{\text{отп. зима год}}$, $W_{\text{отп. лето год}}$ – отпуск электроэнергии в сеть за зимние и летние дни календарного года, тыс. кВт·ч;

$W_{\text{отп. зима } T}$, $W_{\text{отп. лето } T}$, – отпуск электроэнергии в сеть за зимние и летние дни периода T , тыс. кВт·ч.

$T_{\text{зима}}$, $T_{\text{лето}}$ – число зимних и летних дней за период T , дн;

$T_{\text{зима год}}$, $T_{\text{лето год}}$ – число зимних и летних дней в году;

4) Определяется суммарный эффект на годовом интервале \mathcal{E}_n год:

$$\mathcal{E}_{n \text{ год}} = \mathcal{E}_{\text{зима за год}} + \mathcal{E}_{\text{лето за год}}. \quad (4)$$

Рассмотрим пример оценки эффекта от оптимизации мест замыкания распределительной электрической сети, направленной на снижение нагрузочных потерь. Фактический эффект определен за второе полугодие 2012 г. и составляет 78 тыс. кВт·ч. Плановый эффект за год – 181 тыс. кВт·ч. Пропорциональное увеличение эффекта на годовом интервале позволяет получить величину 156 тыс. кВт·ч. Расчет по разработанному алгоритму дает результат $\mathcal{E}_{n \text{ год}} = 173$ тыс. кВт·ч, что повышает точность расчета на 11 %.

Полученные эффекты $\mathcal{E}_{\text{ф.п год}}$ и $\mathcal{E}_{n \text{ год}}$ являются оценкой эффекта от соответствующих МСП за календарный год, для которого был произведен расчет планового эффекта. В случае если оценка фактического эффекта значительно ниже расчетного планового, необходим детальный анализ внедрения МСП как по объемам внедрения, так и по конкретному электрооборудованию.

Вывод.

Основной задачей реализации системы мониторинга является своевременное обеспечение органов управления ТСО актуальной информацией о ходе реализации МСП и достигнутых количественных и качественных показателей, предусмотренных программы.

Литература

1. **Об энергосбережении** и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации, Федеральный закон от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ.
2. **Вуколов, В.Ю.** Организация системы мониторинга уровня энергетической эффективности / В.Ю. Вуколов // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов. ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново, 2012. – Т.3. С. 72-76.

3. **Вуколов, В.Ю.** Повышение надежности и эффективности функционирования сетей 6 – 35 кВ / В.Ю. Вуколов, Б.В. Папков // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.62. Иваново: ПресСто, 2011. С.38-47.

Экспериментальное подтверждение достоверности функциональных зависимостей для расчета потерь при несимметричной нагрузке трансформатора 10(6)/0,4 кВ

После резкого снижения электропотребления в 90-х годах в настоящее время во многих регионах оно так и не достигло предкризисного уровня [1]. Анализ протоколов измерений для трансформаторов, установленных в городских, сельских и промышленных сетях [2], показал, что в распределительных трансформаторах мощностью до 1000 кВА основные потери – потери ХХ. Это объясняется тем, что распределительные трансформаторы мало загружены и их нагрузка несимметрична. Экономичность их работы принято оценивать либо по коэффициенту полезного действия (КПД), либо по относительным потерям, графики которых в зависимости от загрузки для отдельного трансформатора, по своей сути, являются инверсией графиков КПД.

Главный фактор увеличения потерь – смещение нейтрали по причинам: применение схемы звезда–звезда с нулём, у которой сопротивление нулевой последовательности в несколько раз больше сопротивления прямой (обратной) последовательности; неравномерное подключение нагрузок между фазами; 70 % протяжённости распределительных сетей (РС) на напряжении 0,4 кВ. Основной причиной сверхнормативных потерь в РС является несимметрия нагрузок распределительных трансформаторов (РТ). Поэтому актуальным является вопрос об ее влиянии на потери активной мощности в трансформаторах.

В работах [3, 4] были выполнены исследования превышения потерь от токов обратной и нулевой последовательностей в сравнении с потерями от токов прямой последовательности, а также зависимостей полной, активной, реактивной мощностей, коэффициента реактивной мощности, пульсирующей мощности, в общем виде и частных случаях для каждой из четырех схем трехфазной сети с симметричной системой источников ЭДС и несимметричной активно-индуктивной нагрузкой: соединенной в звезду с изолированной нейтралью; соединенной в треугольник; соединенной в звезду с глухим соединением нейтрали нулевым проводником; соединенной в звезду с глухим соединением нейтрали нулевым проводником, сопротивлением которого можно пренебречь.

С целью подтверждения работоспособности и достоверности полученных функциональных зависимостей для расчета потерь при несимметричной нагрузке трансформатора, были проведены измерения на физической модели «трансформатор 10(6) / 0,4 кВ – несимметричная нагрузка».

Экспериментальные измерения проводились в лаборатории «Несимметричных и несинусоидальных режимов работы распределительных сетей», кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов», под руководством д.т.н., профессора Троицкого А.И.

Стендовые испытания модуля «трансформатор – несимметричная нагрузка» осуществлялись с использованием трехфазного двухобмоточного трансформатора марки ТСЗ-2,5, номинальной мощностью 2,5 кВ·А, напряжением на обмотке ВН 220 В, на обмотке НН – 127 В.

В процессе измерений были использованы измерительные приборы: комплект измерительный К-540 заводской № 1213; портативный анализатор качества электроэнергии CIRCUTOR серии AR.5 заводской № 408612036. Все использованные приборы имеют класс точности 0,5 и свидетельства о поверке.

Для моделирования симметричной и несимметричной активной и индуктивной нагрузок были рассчитаны, спроектированы и собраны нагрузочные установки с активным и индуктивным сопротивлениями. Данные установки позволили исследовать режимы работы трансформатора при соединении нагрузки по схемам, приведенным в работах [3, 4].

На основе обработки экспериментальных исследований модуля «трансформатор – несимметричная нагрузка» построены зависимости потерь активной мощности и погрешности расчетов потерь активной мощности от коэффициента загрузки. Ниже приведен анализ экспериментальных данных для схемы соединения нагрузки по схеме «звезда с глухим заземлением нейтрали», но аналогичные зависимости для других схем, указанных в работах [3, 4], в данной статье не приводятся.

При изменении коэффициента загрузки в интервале от 0,24 до 0,42 разница потерь при несимметричном и симметричном режимах с активно-индуктивной нагрузкой незначительно изменяется, что вполне соответствует физике процесса. Дело имеем с режимом XX (условно постоянными потерями). В интервале загрузки 0,42 до 1,0 разница потерь при несимметричном и симметричном режимах увеличивается. Среднее ее значение – 1,679 %.

Расчет без учета несимметрии дает заниженные потери, в отличие от действительных, а предлагаемые функциональные зависимости дают наименьшую погрешность.

В интервале изменения коэффициента загрузки от 0,24 до 0,26 погрешность отрицательная, а от 0,26 до 1,0 – положительная, причем максимальная погрешность 8,41 % при коэффициенте загрузки 0,81 (рис. 1). Средняя погрешность при коэффициенте загрузки от 0,2 до 1,0 без учета несимметрии – 19,7 %, а с учетом предлагаемых функциональных зависимостей – 3,17 %.

Таким образом, потери активной мощности, рассчитываемые по классической формуле, следует корректировать в соответствии со схемами соединения нагрузки согласно разработанным функциональным зависимостям.

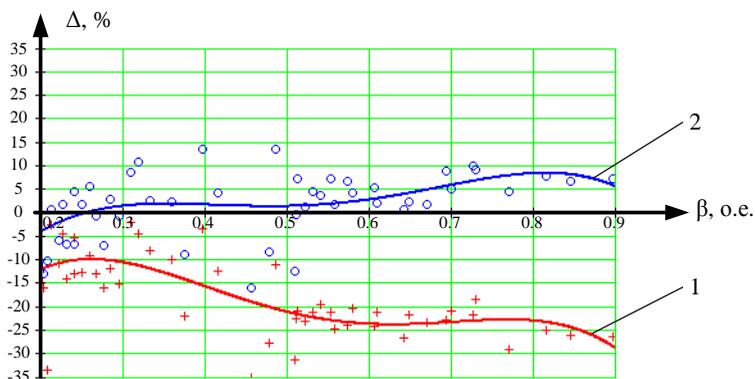


Рис. 1. Зависимость погрешности расчетов потерь активной мощности от коэффициента загрузки при несимметричной активно-индуктивной нагрузке:
 1 – без учета несимметрии; 2 – с учетом несимметрии

Выводы

1. Погрешность вычисления потерь активной мощности в трансформаторе при использовании предлагаемых в статьях [3, 4] функциональных зависимостей лежит в пределах от -10 до $+10$ %. (на основании более 1000 замеров).

2. Учёт фактических потерь холостого хода и короткого замыкания трансформаторов с учётом дополнительных потерь, вносимых несимметричными нагрузками, целесообразен как при выполнении расчётов технологических потерь, так и при обосновании экономического эффекта замены трансформаторов.

Литература

1. **Заугольников В.Ф.** Некоторые аспекты экономической работы силовых трансформаторов / В.Ф. Заугольников, **А.А. Балабин**, А.А. Савинков // Промышленная энергетика, 2006. № 4 – С. 10.
2. **Костинский С.С.** Результаты статистической обработки потерь холостого хода и нагрузочных потерь в распределительных силовых трансформаторах, длительно находящихся в эксплуатации / С.С. Костинский // Изв. вузов. Электромеханика, 2009. – Спецвып.: [Электроснабжение]. – С. 90-92.
3. **Троицкий А.И.** Определение потерь активной мощности при несимметричной активно-индуктивной трехфазной нагрузке, подключенной к системе симметричных источников ЭДС с изолированной нейтралью / А.И. Троицкий, С.С. Костинский // Изв. вузов. Электромеханика, 2012. № 2 – С. 22-25.
4. **Троицкий А.И.** Определение дополнительных потерь при несимметричной активно-индуктивной трехфазной нагрузке, подключенной к системе симметричных источников ЭДС и соединенной по схеме звезда с глухим заземлением нейтрали / А.И. Троицкий, С.С. Костинский, Т.З. Химишев // Изв. вузов. Электромеханика, 2012. № 4 – С. 64-67.

Формирование зоны обхода ЛЭП на основе точностных характеристик алгоритмов ОМП

Задача определения мест повреждений (ОМП) линий электропередачи (ЛЭП) связана с рациональными способами организации поиска и расчета расстояния до повреждений. Основное решение задачи ОМП ЛЭП включает две составляющие:

- ✓ предсказание предполагаемого места повреждения ЛЭП в условиях, включающих элемент случайности;
- ✓ рациональную организацию процесса отыскания повреждения линейной бригадой (обход предполагаемой зоны повреждения) с учетом наличия и влияния случайных факторов.

Для нужд предприятий электрических сетей, эксплуатирующих как магистральные, так и распределительные ЛЭП, важно точно определить не место повреждения, а требуемую зону обхода линии. Для принятия решения по ликвидации повреждения выбранную зону обхода необходимо сопоставить с информацией: об участках эксплуатационной принадлежности ЛЭП; ситуационном расположении линейных бригад; особенностями местности. При этом сокращение зоны обхода линии даже без повышения точности определения расстояния до повреждения можно связывать с повышением эффективности ОМП ЛЭП.

Согласно действующим нормативным документам зона обхода ЛЭП определяется в зависимости от длины линии [1]. В то время как ОМП ЛЭП проводится в условиях, когда элемент непредвиденности, случайности играет огромное значение [2]. Сам механизм определения зоны обхода должен формироваться на основе вероятностных подходов [3], а величина зоны обхода зависит от:

- используемых алгоритмов ОМП и их точностных характеристик;
- особенностей прохождения трассы линии (болота, степи, горы, овраги, леса, жилые кварталы);
- наличия точек заездов (заходов) на линию;
- наличия отпаек на ЛЭП;
- требуемых временных параметров по ликвидации повреждения;
- погодных условий (сильный порывистый ветер, грозовые явления, гололед и др).

Привлечение дополнительной информации о законах распределения ошибки алгоритмов ОМП вдоль ЛЭП позволяет формировать зону обхода линии на основании точности используемых алгоритмов. Сами законы распределения ошибки формируются на основании про-

ведения многократных имитационных экспериментов на заранее проверенной на адекватность модели линии электропередач [2].

Зона обхода должна формироваться на основе доверительных интервалов нахождения случайной величины (места повреждения) в заданном диапазоне (зона обхода ЛЭП) с определенной вероятностью β [4]:

$$P(|I_p - l| < \varepsilon_\beta) = \beta; \quad (1)$$

$$\varepsilon_\beta = \sigma_p \cdot \arg \Phi^* \left(\frac{1 + \beta}{2} \right), \quad (2)$$

где $\arg \Phi^*(x)$ – функция обратная функции $\Phi^*(x)$, т.е. такое значение аргумента, при котором нормальная функция распределения равна x .

Доверительный интервал нахождения повреждения может быть определен как:

$$I_\beta = (I_p - \varepsilon_\beta; I_p + \varepsilon_\beta). \quad (3)$$

Чтобы избежать при вычислении ε_β обратного интерполирования пользуются заранее составленными таблицами t_β :

$$t_\beta = \arg \Phi^* \left(\frac{1 + \beta}{2} \right). \quad (4)$$

Величина t_β определяет для нормального закона распределения число среднеквадратических отклонений, которое необходимо отложить слева и справа от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна β .

Окончательно требуемая зона обхода ЛЭП определяется как:

$$I_\beta = (I_p - t_\beta \cdot \sigma_p; I_p + t_\beta \cdot \sigma_p). \quad (5)$$

Приведем пример определения зоны обхода при повреждении ВЛ 220 кВ Семенов-Рыжково-Мантурово (отпайка на ПС 220 кВ Рыжково), произошедшего 12 июня 2010 г. в Нижегородской энергосистеме. Параметры повреждения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры поврежденной линии

Дата	Наименование ВЛ	Длина ВЛ, км	Со стороны ПС	ИМФ-ЗР, км	ПК WinBres, км	Обученный алгоритм ОМП	Фактич. место повреждения, км
12.06.2010	ВЛ220 Семенов-Рыжково-Мантурово	183,04	Семеновская	93.8	111.72	105.48	107.25

По результатам первичного расчета по ИМФ-ЗР со стороны ПС Семеновская (со стороны ПС Мантурово данные не поступали) линейной ремонтной бригаде была определена зона обхода 91÷106.6 км ($\pm 7\%$ от длины линии) со стороны ПС Семеновская.

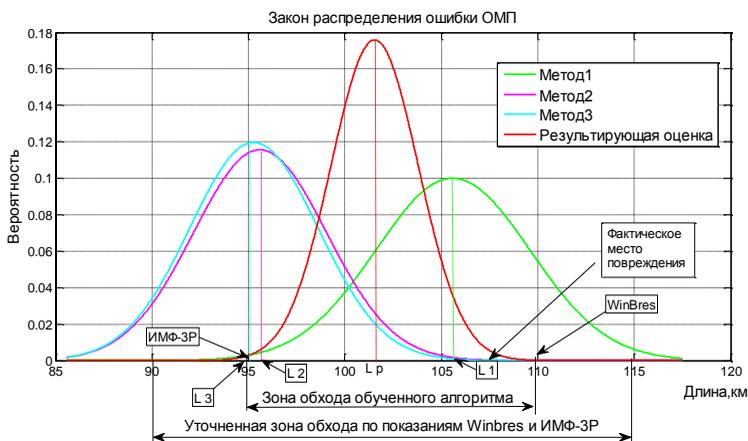


Рис.1. Результаты работы обученного алгоритма формирования зоны обхода по данным аварийного отключения на ВЛ 220 кВ Семенов-Рыжково-Мантурово

При использовании обученного для данной ЛЭП алгоритма с компенсацией ошибок [2] расчетное расстояние до точки КЗ составило 105,48 км (рис. 1), среднеквадратическая ошибка ОМП ЛЭП данного участка линии - 3,64 км. Тогда, согласно выражениям (1÷5) для доверительной вероятности $\beta = 0,95$ зона обхода ЛЭП должна составить от 98,3 до 112,6 км линии со стороны ПС Семеновская, что составляет 3,9 от длины линии. Таким образом, оценка расстояния на основе обученных для данной линии алгоритмов оказалась точнее, а зона обхода меньше на 9,8 км.

Выводы

1. Зона обхода, сформированная на основе точностных характеристик алгоритмов ОМП, является перспективной с точки зрения экономии сил и средств, затрачиваемых на поиск места повреждения.

2. Для приведенного примера зона обхода была сокращена на 59 %, т.е. с 24,1 км до 14,3 км.

Литература

4. **Порядок** взаимодействия административно-технического, ремонтного и оперативного персонала при определении мест повреждения на ВЛ ЕНЭС: Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 29.03.10 № 192. – М.: 2010.
5. **Куликов, А. Л.** Комплексные алгоритмы определения мест повреждения линии электропередачи на базе статистических методов / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, П.А. Колобанов // Энергетик. – 2012. - № 1. – С. 7-10.
6. **Беляков Ю. С.** Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи // Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик» – 2010.- № 11.
7. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. – М.:, 1969.

Способ реконструкции воздушной линии электропередачи в сетях 6–10 кВ

Реконструкция автомобильных дорог, строительство жилых и общественных зданий, как правило, сопровождается переустройством электрических сетей, попадающих в зону строительства. Различный уровень напряжения электрических сетей, привязка к подстанциям и потребителям, условия по пересечению, сближению и параллельному следованию, нормируемые ПУЭ, формируют сложные технические задачи при переустройстве электрических сетей.

Основные тенденции развития и реконструкции современных электрических сетей направлены на переустройство воздушных ЛЭП в кабельные линии. Современные способы прокладки под землей делают кабельные линии более надежными, они имеют большую степень защиты, лучшие эксплуатационные характеристики, не подвержены климатическим воздействиям. Кроме того, воздушные ЛЭП дают электромагнитное излучение, которое так или иначе влияет на организм человека. Кабельные линии подобного воздействия не оказывают. Работы в этом направлении ведутся с начала 2000-х годов. Особенно такая реконструкция актуальна для больших городов. Занимаемые под воздушные ЛЭП площади с учетом зон отчуждения – это колоссальные территории, которые могут быть задействованы под строительство [1, 2, 3]. Использование современных кабелей и способов прокладки качественно улучшают электрическую сеть. При переустройстве воздушной ЛЭП в кабельную наземные сооружения демонтируются, что улучшает архитектурный облик местности и решает проблему отвода земли под опоры. Кабельная линия более компактна, что актуально при плотной застройке местности и расширении автомобильных дорог [2].

Электрические распределительные сети 6 – 10 кВ наиболее разветвленные по своей структуре и, как правило, имеют большое количество ответвлений (отпаек) от магистрали. Отпайки от воздушной ЛЭП выполняются согласно типовым проектам и представляют собой стандартную техническую задачу. Однако, при переустройстве такой воздушной ЛЭП в кабельную, задача переходит на более сложный уровень.

При выполнении проекта реконструкции магистральной автомобильной дороги общего назначения часть двухцепной воздушной ЛЭП 6 кВ, выполненной на железобетонных стойках типа СК-22, попадает в зону строительства. Между реконструируемой автомобильной дорогой и существующими частными территориями расстояние составляет от 2 до 4 м, поэтому перенос ЛЭП на обочину автодороги согласно ПУЭ по условиям сближения с автомобильной дорогой и с жилыми домами

невозможен даже для стесненных условий. Задача усложнена также тем, что двухцепная ЛЭП соединяет две крупные подстанции и является основной магистралью – от нее осуществляется электропитание всех небольших подстанций района, выполняющих электроснабжение предприятий, общественных и жилых зданий. Участок воздушной ЛЭП протяженностью 1,32 км имеет кабельные присоединения одним или двумя кабелями к семи подстанциям и нескольким предприятиям.

При решении поставленной задачи рассматривались различные варианты переустройства. Сохранение способа прокладки и перенос воздушной ЛЭП вглубь жилого района выполнить невозможно из-за плотной застройки, узких улиц с наличием других инженерных коммуникаций. Единственно возможный вариант – убрать ЛЭП в землю – поставил задачу: как обустроить ответвления от высоковольтного кабеля в земле. Ответительные муфты допускается применять только в кабельных линиях напряжением до 1 кВ. Прокладка параллельных кабельных линий для каждого потребителя от питающей подстанции – мероприятие очень затратное, поэтому экономически нецелесообразное.

При решении задачи переустройства двухцепной воздушной ЛЭП было принято следующее решение. Для выполнения отпаек от магистрального кабеля разработаны переходные пункты. Переходные пункты установлены в местах наибольшей концентрации отпаек от ЛЭП. Переходный пункт представляет собой модульное здание, содержащее камеры КСО-393. Количество шкафов КСО-393 соответствует количеству входящих и отходящих линий. Кабельные линии, приходящие к опорам воздушной ЛЭП, демонтируются, переносятся к переходным пунктам и вводятся в ячейки КСО-393. Далее кабельные линии отводятся к подстанциям или потребителям согласно схеме электропитания сетевого района. Для решения этой задачи, разработанные переходные пункты содержат по 10 шкафов КСО-393 - по 5 в каждом ряду, соединенных шинными мостами. Функциональное назначение переходных пунктов – распределительное устройство для выполнения отпаек от магистральной кабельной линии. Шкаф КСО-393 в переходном пункте выполняет роль коммутационного узла. Схема главных цепей каждого шкафа может быть различной – в него можно установить разъединитель, выключатель нагрузки или вакуумный выключатель [4]. Шкафы отходящих линий могут содержать контрольно-измерительные приборы и приборы учета, устройства РЗА.

Тип шкафов КСО в переходных пунктах может быть различным. Камеры сборные однофазного обслуживания третьей серии КСО-393 предназначены для приема и распределения электрической энергии переменного трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 6(10) кВ с изолированной или заземленной через дугогасительный реактор нейтралью. КСО-393 применяются для установки в распределительных устройствах 6 (10) кВ промышленных объектов, городских электрических сетей, систем электрификации железнодорожного

транспорта, нефтегазовой отрасли. Из камер КСО собираются распределительные устройства (РУ), служащие для приема и распределения электроэнергии. Технические параметры и режимы работы определяются совокупностью схем главных и вспомогательных цепей камер КСО.

Переходный пункт устанавливается на фундамент, выполненный из железобетонных блоков. Высота фундамента и способы закрепления определяются типом грунтов. Кабельные линии подходят в здание переходного пункта по потерне и распределяются по шкафам КСО-393 в соответствии со схемой. Вокруг здания переходного пункта устраивают контур заземления, который присоединяют к корпусу здания.

Разработанный переходный пункт может иметь различное функциональное назначение. Если переходный пункт выполняет функцию узла электрической сети, в шкафах КСО-393 устанавливают разъединитель, дополнительно можно установить защитные элементы (предохранители, разрядники и т.п.). При подключении к ячейке отходящих фидеров потребителей возможна установка дополнительных приборов учета или контрольно-измерительных приборов. Это особенно актуально на сегодняшний день, когда промышленные и электросетевые предприятия делают акцент на энергосберегающую политику.

Известно, что секционирование линий является одним действенных способов повысить надежность работы электрической сети и эффективность защиты электрооборудования. Если на воздушных ЛЭП секционирование линий является технологией отработанной, в кабельных линиях для этих целей можно применять переходные пункты. Особенно это выгодно в узлах с большим разветвлением электрической сети. В переходных пунктах, применяемых для секционирования, в ячейки КСО-393 можно устанавливать выключатели нагрузки или вакуумные выключатели, а также аппаратуру РЗА.

Литература

1. **С высоты** под землю. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://expert.ru/northwest/2012/43/s-vysoty-pod-zemlyu> (Дата обращения: 15.11.2012)
2. **Линии** электропередачи в городских условиях. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.stroyka.ru/Rynok/detail.php?ID=477086> (Дата обращения: 16.11.2012)
3. **Особенности** реконструкции систем инженерного обеспечения территорий. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://stroy-spravka.ru/osobennosti-rekonstruktsii-sistem-inzhenerenogo-obespecheniya-territorii> (Дата обращения: 19.11.2012)

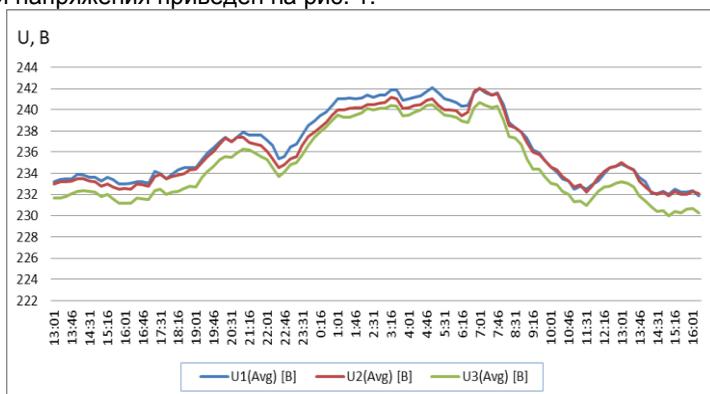
Энергоэффективность потребительских подстанций некоторых производств

Проблема неполного использования мощности потребительской трансформаторной подстанцией не нова. Используемая методика выбора мощности трансформатора основана на среднесменной нагрузке и коэффициенте загрузки, успешно работавшая на этапе динамично развивающегося крупного производства все чаще ведет к значительному завышению номинальной мощности трансформатора при неритмичном производстве на средних и мелких предприятиях.

Также специфика некоторых производств, связанных с добычей полезных ископаемых претерпевает изменения, обусловленные изменением условий добычи. Электрооборудование нефтегазоконденсатных месторождений эксплуатируется в режиме отличном от сменного режима крупного промышленного предприятия.

Для однотрансформаторной потребительской подстанции ТП-1 с трансформатором ТМ-630 проводились измерения основных показателей качества электроэнергии в течение 27 часов 30 минут с интервалом 15 минут. Используемые измерительные средства - анализатор качества электроэнергии Metrel MI 2492 PowerQ производства Словении. Обработка результатов велась Metrel Power View 1.0.0.799.

Результаты замера некоторых показателей качества электроэнергии НГКМ показал следующие данные. Средняя потребляемая мощность составляет 198,68 кВА, максимальная 237,8 кВА, минимальная 176,9 кВА. Средний коэффициент мощности составляет 0,62. Фазные напряжения изменяются в диапазоне 230 – 242 В. График изменения напряжения приведен на рис. 1.



Рису. 1. График изменения напряжения для ТП-1

В результате измерения аналогичных показателей для однотрансформаторной подстанции ТП-2 с трансформатором ТМ-160 в течение такого же интервала времени получены следующие данные. Средняя потребляемая мощность составляет 18,08 кВА, максимальная 22,6 кВА, минимальная 14,9 кВА. Средний коэффициент мощности составляет 0,28. Средние фазные напряжения составляли 230,1 В при незначительной несимметрии в одной фазе. График изменения напряжения приведен на рис. 2.

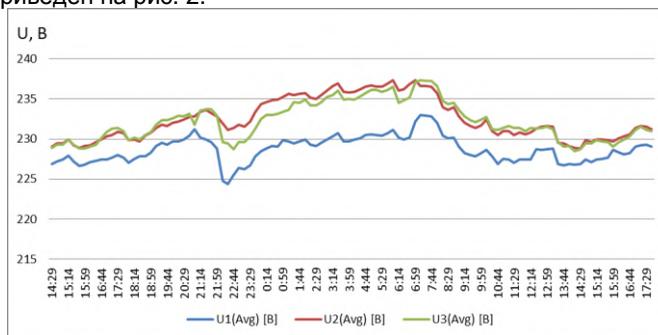


Рис. 2. График изменения напряжения

Анализ приведенных показателей показал, что средний коэффициент загрузки трансформатор ТМ-630 установленного на ТП-1 составил 0,32. Для ТП-2 в рассматриваемом промежутке времени K_z составил 0,11, что значительно ниже значений, рекомендуемых в [1] и [2]. Режим работы трансформаторов ТП-1 и ТП-2 находится в области неэффективных значений, что значительно увеличивает долю потерь электроэнергии в составе мощности, передаваемой этими трансформаторами.

Низкий коэффициент мощности не способствует поддержанию нормального уровня напряжения. Значение напряжения напротив, находится в области предельно допустимых значений согласно [3].

Приведенные результаты измерений позволяют сделать вывод о крайне неэффективной работе трансформаторов указанных подстанций. Очевидно, что при выборе трансформаторов, расчетная нагрузка оказалась завышена.

Учитывая факт выбора этих трансформаторов в соответствии с расчетной нагрузкой, определенной согласно [4], можно сделать вывод о необходимости уточнения состава электроприемников некоторых производств, которые необходимо учитывать при расчете.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. - Вып. 8. - 6-е и 7-е изд. - Новосибирск : Новосиб. ун-т, 2007. - 854 с. - ISBN 5-379-00206-4.

2 НТП ЭПП-94. Нормы технологического проектирования электроснабжения промышленных предприятий. -М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1994. – 67 с.

3 ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Введ 1999-01-01. –М.: Стандартиформ, 2006. – 32 с.

4 Указания по расчету электрических нагрузок. РТМ 36.18.32.4-92 / Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. – 1992. -№7. –8. С. 4–28.

УДК 621.3.051.02

А.С. ВЕДЕРНИКОВ, к.т.н., доцент,
И.Н. КРИВИХИН, студент,
Е.М. ШИШКОВ, ассистент
(СамГТУ) г. Самара

Выбор оптимального расположения фазных проводов двухцепной воздушной линии электропередачи

Специфику двухцепных воздушных линий электропередачи (ДВЛ) и электромагнитных процессов в них во многом определяет компактность конструкции, то есть малые расстояния между всеми фазными проводами и тросами цепей. Физическим отражением этого являются значительные электромагнитные взаимные связи цепей и их составляющих. С точки зрения трехфазного построения технологий, оборудования и режимов в электрических системах это определяет их несимметрию по внутренним параметрам и параметрам режимов, значительно более сложную в сравнении с одноцепными ВЛ [1].

Двухцепные линии можно отнести к принципиально несимметричным электроустановкам, поскольку трехфазные системы токов и напряжений цепей не будут создавать сбалансированные электромагнитные поля даже в условиях симметричных значений режимных параметров.

Основываясь на сказанном, можно говорить о том, что величина потерь при передаче электрической энергии по проводам ДВЛ в значительной мере будет зависеть от взаимного расположения проводов.

Поскольку существующие программные комплексы расчёта установившихся режимов основываются на однопроводных моделях линии и её режимов, они не позволяют оценить величину потерь и несимметрию напряжения в конце линии.

В связи со сказанным выше, рассмотрены следующие задачи:

- расчёт спектра установившихся режимов ДВЛ;
- определение оптимального расположения фазных проводников цепей ДВЛ по критерию минимума потерь электрической энергии при её передаче;

- определение оптимального расположения фазных проводников цепей ДВЛ по критерию минимума коэффициентов несимметрии напряжения в конце ДВЛ.

Рассмотрение сформулированных задач произведено на примере ДВЛ напряжением 220 кВ, длиной 76,83 км, с опорами типа ПМТ_В, проводами марки АСО-480, одним проводом в фазе и грозозащитным тросом марки С-70.

Известно [2], что уменьшение несимметрии токов и напряжений промышленной частоты, обусловленной неравенством фазных параметров двухцепных линий, может быть достигнуто за счет перестановки фазных проводов на опорах «изменения фазировки». Данный способ заключается в рациональном использовании электромагнитного влияния одной цепи на другую, что приводит к выравниванию реактивных параметров отдельных фаз.

Для анализа установившихся режимов ДВЛ в работе использована обобщённая модель линии в фазных координатах [3].

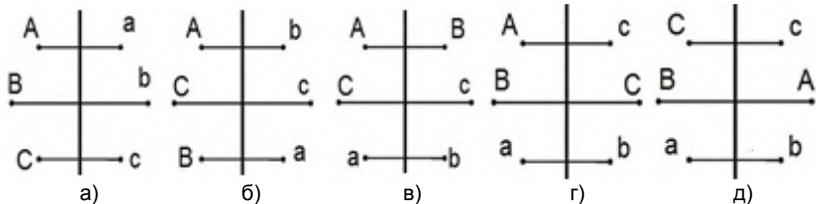


Рис. 1. Способы расположения фазных проводов на опоре ДВЛ

Используя математическую модель и методики расчета установившихся режимов ДВЛ в фазных координатах, определялись зависимость потерь мощности и величины пофазной несимметрии напряжений в цепях ДВЛ от вариантов размещения фазных проводов. Для обеспечения сопоставимости результатов в произведённых расчётах принималась равная величина нагрузки в цепях ДВЛ со значением коэффициента мощности, равным 0,8.

Традиционным способом размещения проводников ДВЛ на одноступенчатых опорах является тот, когда цепи расположены по разные стороны от стойки опоры (рис. 1,а). Такой способ существенно облегчает ремонт ДВЛ, поскольку даёт возможность вывести в ремонт одну из цепей, в то время как вторая остаётся под нагрузкой. Произведён расчёт всех возможных вариантов расположения проводников, включая те, которые предполагают проход цепи ДВЛ по обе стороны стойки опоры. На рис. 1,б-д представлены четыре наиболее эффективных способа фазировки, выявленных в результате расчёта.

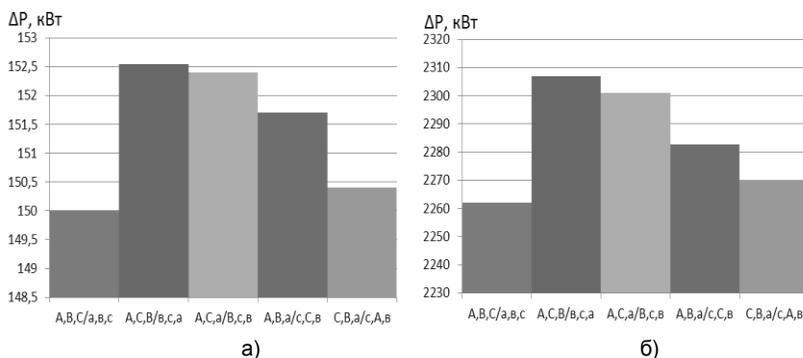


Рис. 2. Потери активной мощности в цепях ДВЛ для различных способов фазировки при нагрузках цепей 30 МВА (а) и 120 МВА (б)

На рис. 2,а,б детализированы величины потерь мощности в ДВЛ при значениях нагрузки цепи в 30 и 120 МВА соответственно. Как можно заметить, при любых значениях нагрузки, наименьшие потери в линии имеют место при использовании традиционного способа фазировки.

Однако с точки зрения минимума уровня несимметрии в цепях оптимальным является один из нетрадиционных способов фазировки (рис. 1,б). Это подтверждается расчётами величин коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности в конце цепей ДВЛ, произведёнными согласно ГОСТ 13109-97 (рис. 3). Несмотря на то, что величина коэффициентов несимметрии не превышает предельно допустимых значений, необходимо учитывать их при проектировании ДВЛ, поскольку данная несимметрия обусловлена исключительно внутренней несимметрией, в то время как подключенная к линии нагрузка является полностью симметричной.

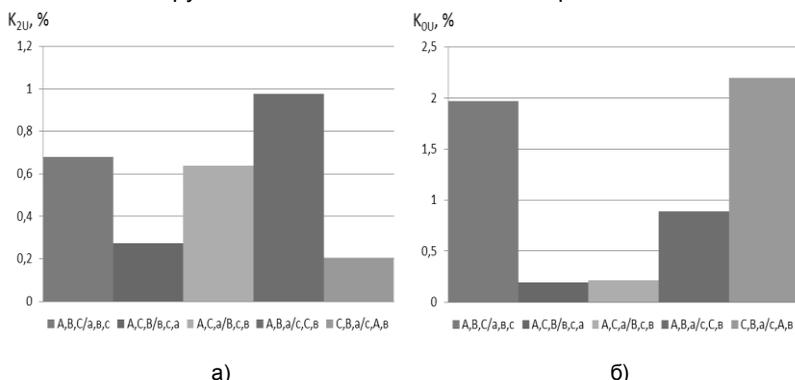


Рис. 3. Наибольшие значения коэффициентов несимметрии в конце цепи ДВЛ по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям.

Подводя итог сказанному, можно сделать следующие выводы.

1. Проведенный анализ вариантов расположения фазных проводов на опорах ДВЛ с учетом конструктивных и режимных изменений показал, что оптимальным по критерию минимума потерь активной мощности является традиционный способ фазировки линии, повсеместно используемый на практике.

2. Проведенный анализ вариантов расположения фазных проводов на опорах ДВЛ с учетом конструктивных и режимных изменений показал, что оптимальным по критерию величины пофазной несимметрии является способ фазировки линии, изображённый на рис. 1,б.

Литература

1. **Шишков Е.М.** Влияние несимметрии двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы / Е.М. Шишков, А.С. Ведерников, В.Г. Гольдштейн // Электричество. – 2013. – № 4. – С. 9-18.
2. **Евдокунин Г.А.** О целесообразном расположении фаз двухцепных воздушных линий для снижения пофазной несимметрии / Г.А. Евдокунин, Ю.В. Чуйков, О.В. Щербачев // Электрические станции. – 1980. – № 3.
3. **Ведерников А.С.** Применение теории обобщённых четырёхполюсников для расчёта установившихся режимов двухцепных воздушных линий электропередачи / А.С. Ведерников, Р.А. Гайнуллин, Е.М. Шишков // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5/6. – С. 86-90.

УДК 62-519

М.Н. КИРЖАЦКИХ, студент,
Е.Р. УКАНЕЕВА, студент
(КГЭУ) г.Казань

Диагностика, мониторинг и борьба с обледенением линий электропередачи на основе беспилотного летательного аппарата

Современное общество невозможно представить без электроэнергии. С ростом уровня жизни населения, а также увеличением электрификации в России и в мире в целом, появляется острая необходимость в увеличении объемов выработки электричества, которая несет в себе новые проблемы, требующие для решения современного взгляда и подхода.

Идея использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для обследования ландшафта в труднопроходимых местах и на отдаленных расстояниях в электроэнергетике зародилась и получила свое развитие не так давно, но развивается довольно стремительно, к сожалению, в основном за рубежом. Такие устройства стали активно ис-

пользовать нефте- и газодобывающие компании. В энергетике известен обширный опыт многих стран, таких как США, Израиль и другие. В России одними из первых запусков БПЛА для мониторинга ЛЭП (500 кВ Вешкайма-Пенза) в лесной зоне с целью получения информации об их состоянии, было проведено осенью 2011 года в Ульяновской области.

Целью же нашего проекта является разработка более широкого комплекса по диагностике, мониторингу и борьбе с обледенением воздушных линий электропередач (ВЛЭП) на основе БПЛА. БПЛА будет позволять проводить высокоскоростную диагностику ВЛЭП на наличие повреждений и дефектов с минимальным числом ошибок, а также:

- увеличивать скорость диагностики (а, в результате, и ускорять устранение повреждения);

- проводить инспектирование в труднодоступных районах прохода ЛЭП (леса, горная местность), что просто невозможно при использовании традиционных методов;

- сокращать количество персонала и приборов, необходимых для проведения диагностики традиционными методами.

Решение всех перечисленных выше моментов приведет к экономии средств, затрачиваемых на диагностику и устранение неисправностей.

О проекте.

Сам проект осуществляется на основе квадрокоптера (летательный аппарат с четырьмя роторами, вращающимися диагонально в противоположных направлениях) и встроеной в него платы от «National instruments». Микропроцессорная система переводит команды радиоуправления в команды двигателям. Чтобы обеспечить стабильное висение, мультикоптеры в обязательном порядке снабжают тремя гироскопами, фиксирующими крен аппарата. Такой беспилотник способен как на автоматическое передвижение по заранее заданным координатам, так и на беспилотное дистанционно-пилотируемое передвижение (ДПЛА). GPS-приемник, позволяющий записывать маршрут полета заранее, с компьютера, а также возвращать аппарат в точку взлета, в случае потери управляющего радиосигнала или оперативно снимать параметры полета. Планируемое питание должно будет достигаться путем зарядки батарей за счет электромагнитной индукции поля ЛЭП. Одним из наиболее перспективных способов обеспечения питания рассматривается зарядка батареи. Суть заключается в том, что на БПЛА будет размещен магнит, на котором расположена обмотка. При движении вдоль переменного магнитного поля, на обмотке появится ток, достаточный для питания силовых и информационный частей БПЛА. Для навигации по электрическому полю необходимо оборудовать аппарат датчиками напряженности, размещаемые на концах БПЛА.

Альтернативным вариантом является переход БПЛА в ручное управление и посадка на ЛЭП для заряда источников питания. Недо-

статком данного способа является необходимость компенсации токов наводимых в системе управления БПЛА, которые способны негативно повлиять или вовсе вывести из строя систему управления. Изначальное применение БПЛА определялось как боевое. Однако с начала 2000-х годов колоссальное значение стали приобретать «микро-беспилотники», разрабатываемые не для военных, а сугубо гражданских целей.

Гражданская область применения БПЛА весьма обширна: от сельского хозяйства и строительства до нефтегазового сектора и сектора безопасности. «Дроны» гражданского назначения могут использоваться в работе служб по чрезвычайным ситуациям (контроль пожарной безопасности); полиции (патрулирование зон); предприятий сельского хозяйства (наблюдение за посевами), лесничества и рыболовства (лесоохрана и контроль рыбного промысла); компаний, занимающихся геодезией (картографирование); институтов географии и геологии; компаний нефтегазового сектора (мониторинг нефтегазовых объектов); строительных предприятий (инспектирование строек); средств массовой информации (аэрофото- и видеосъемка) и др.

Согласно находящимся в открытом доступе документам организаций Европейского Союза, распределение потребительского спроса на гражданские БПЛА в период с 2015 по 2020 г. выглядит следующим образом: 45 % – правительственные структуры, 25 % – пожарные, 13 % – сельское хозяйство и лесничество, 10 % – энергетика, 6 % – обзор земной поверхности, 1 % – связь и вещание.

Обледенение ВЛЭП.

Проблема обледенения довольно часто встречается на территории нашей страны и несет гигантские потери для энергетических предприятий. Для выявления обледенения необходимо вручную проверять наличие льда на проводниках. Данный способ является медленным, а зачастую и дорогим. Использование БПЛА позволит сократить время обнаружения и своевременно предупредить оператора об опасности обрыва кабеля. В настоящее время подобные исследования ведутся в Японии и США.

Существует несколько вариантов обнаружения обледенения. В частности это тепловизионное и оптическое сканирование кабелей.

Недостатком тепловизионного сканирования является высокая стоимость тепловизионных датчиков и их низкая частота обработки кадров.

Данных недостатков лишены оптические датчики, которые способны измерять степень отражения объектов, попавших в зону чувствительности. Кроме того они имеют большую пропускную способность и быстродействие. Принцип основан на явлении отражения света от поверхности тела. Коэффициент отражения изоляции ЛЭП и льда совершенно отличаются, следовательно, оптические датчики могут использоваться для обнаружения обледенения. Так же данные датчики не так сильно зависят от погодных условий как тепловизионные. Недостат-

ком таких датчиков служит необходимость постоянного нахождения проводника в строго ограниченной зоне чувствительности датчика.

Подобный проект беспилотника способен существенно снизить расходы энергетических предприятий в результате своевременного нахождения дефектов и их устранения.

Литература

1. **Лебедев Д.Е.** Методы аэродиагностики воздушных линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжений / Д.Е. Лебедев, В.Е. Качесов; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2011.
2. **Арбузов Р.С.** Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи/ **Р.С. Арбузов, А.Г. Овсянников** – Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с.
3. **Патент РФ № 2421746** (от 20.06.2011), МПК G01R31/08. Способ диагностики высоковольтной линии электропередачи / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев // БИ № 17, 2011.

УДК 621. 314

Ю.И. ХОХЛОВ, д.т.н., профессор,
М.Ю. ФЕДОРОВА, аспирант,
Е.В. КУЗЬМИНА, аспирант,
П.В. САМОХИН, аспирант
(ЮУрГУ) г. Челябинск

Энергоэффективные системы электроснабжения для реализуемых с применением постоянного тока электротехнологий

В настоящее время при осуществлении ряда энергоемких электротехнологий широко используются системы электроснабжения (СЭС) с преобразованием переменного тока в постоянный. Ряд электротехнологий после указанного преобразования реализуется непосредственно на постоянном токе. Таковыми являются электролизные производства цветной металлургии (электролиз алюминия, меди, цинка, никеля, магния и др.), электролизные производства химической промышленности (электролиз хлора, водорода, капролактама и др.), электротермические производства (электрографитация в электродной промышленности, выплавка стали в металлургии и др.), электрифицированный городской (трамвай, троллейбус, метро) и железнодорожный транспорт.

Развивающимся направлением применения процесса выпрямления является также его использование в СЭС с последующим инвертированием энергии постоянного тока в энергию переменного тока с плавным управлением величины и частоты выходного напряжения. Сюда относятся общепромышленный электропривод, установки индукционного нагрева, перспективные буровые установки нефтегазодобывающего

комплекса и др. И в том, и в другом случае к выпрямительным агрегатам СЭС предъявляются высокие требования по энергетическим показателям, поскольку последние во многом определяют энергоэффективность всего электротехнологического процесса.

Ухудшение энергетических показателей выпрямительных агрегатов, с одной стороны, обусловлено коммутационными процессами в вентилях и переходом многофазных агрегатов в глубокие режимы работы. С другой стороны, особенно существенное ухудшение имеет место при использовании внутреннего плавного фазового (тиристорного или дроссельного) регулирования выпрямленного напряжения.

С целью эффективного устранения первой причины в работе предлагается перевод выпрямительных агрегатов в компенсированный режим работы. Однолинейная схема одного из вариантов симметричного компенсированного выпрямителя (СКВ) с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах компенсирующего устройства (КУ) приведена на рис. 1 [1,2]. Подобные СКВ обеспечивают полную компенсацию потребляемой из сети (ПС) реактивной мощности.

Одновременно они способны адаптивно стабилизировать выходное напряжение при изменении в широком диапазоне их токовой нагрузки (режим компенсированного параметрического источника напряжения (КПИИ)), что особенно важно, например, для электрического транспорта.

Для снижения действия второй причины предлагается вынесение системы плавного управления выпрямителями во внешнюю цепь. Примером может служить СЭС по схеме на рис. 2 [3, 4]. С помощью настроенных в резонанс стабилизирующих реактора (L_c) и конденсаторной батареи (C_c) обеспечивается адаптивная стабилизация тока нагрузки при изменении в широком диапазоне напряжения (режим компенсированного параметрического источника тока – КПИТ). Такое управление используется в условиях электролиза.

Главное внимание в работе уделяется гибким СЭС электротехнологических установок, в которых последовательная компенсация реактивной мощности осуществляется с помощью СКВ, а внешнее управление с помощью автономных инверторов напряжения с синусоидальной ШИМ [5]. В качестве примера на рис. 3 и 5 представлены схемы двух таких СЭС. Способы внешнего векторного управления при снижении и возрастании потребляемой из питающей сети реактивной мощности иллюстрируются соответственно на рис.4,а и б. На рис. 4, в для СЭС, содержащей минимум два р-фазных СКВ, показана возможность управления при сохранении потребления реактивной мощности и снижении мощности искажения [6].

В работе рассматриваются результаты аналитического исследования, цифрового моделирования, художественного конструирования и дизайна предложенных СЭС [7].

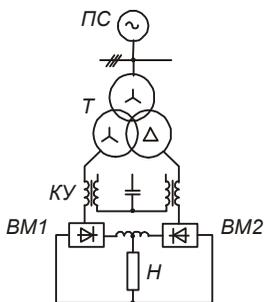


Рис. 1. Принципиальная схема СЭС с СКВ

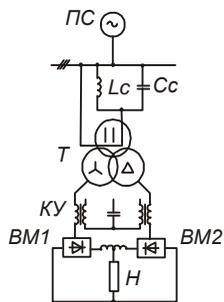


Рис. 2. Принципиальная схема СЭС с КПИТ

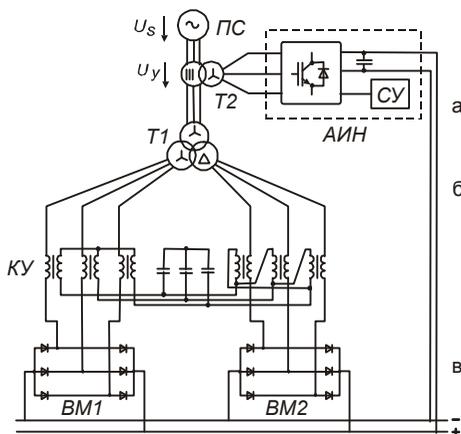


Рис. 3. Принципиальная схема СКВ с векторным управлением

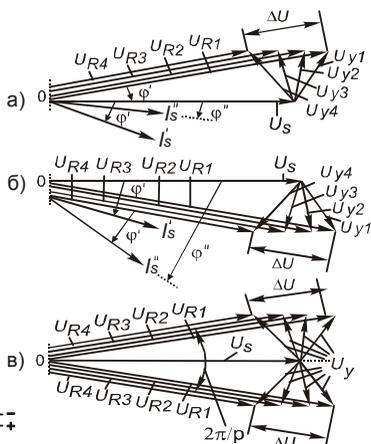


Рис. 4. Способы векторного управления СКВ

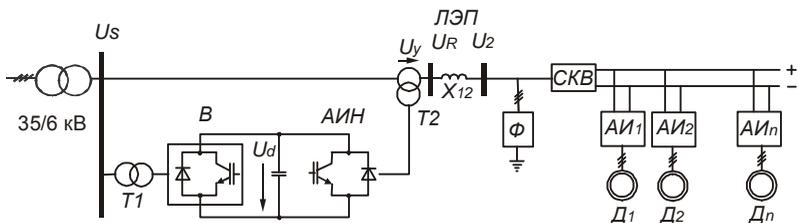


Рис. 5. Принципиальная схема СЭС удаленных буровых установок нефтегазодобывающего комплекса

Литература

1. **Патент 1124414 (РФ)**. Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Хохлов – БИ, 1984, № 42.
2. **Хохлов Ю.И.** Результаты промышленных испытаний первого компенсированного выпрямительного агрегата с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах / Ю.И. Хохлов, И.Л. Красногорцев, С.Г. Ляпкало и др. // Электричество. – 1989. – № 3. – С. 26-31.
3. **Патент 1339534 (РФ)**. Устройство для питания электротехнологических установок / К.Д. Гуттерман, Ю.И. Хохлов, В.В. Володин и др. – БИ, 1987, № 35.
4. **Хохлов Ю.И.** Компенсированные параметрические источники тока и их свойства // Электричество. – 2007. – № 3. – С. 42-48.
5. **Патент 2333589 (РФ)**. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Ю.И. Хохлов – БИ, 2008, № 25.
6. **Патент 2410830 (РФ)**. Способ управления многофазной системой электропитания потребителей постоянного тока / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова – БИ, 2011, № 3.
7. **Схемные**, конструкторские и дизайнерские решения компенсированной системы электроснабжения сверхудаленных буровых установок с существенной величиной прочей нагрузки / Хохлов Ю.И., Федорова М.Ю., Шабиев С.Г. и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика, 2012. – Вып. 18. – № 37. – С. 6-11.

УДК 621.314

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент
А.А. ЯБЛОКОВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

К вопросу создания модели измерительного трансформатора напряжения с разомкнутым магнитопроводом

В работе [1] приведено сравнение результатов расчетов вариантов конструкций трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом по метрологическим характеристикам (выполнены полевые расчеты в пространственно-частотной области и сравнение амплитудных и фазовых погрешностей на основной гармонике). Для исследования антирезонансных свойств вариантов конструкций таких трансформаторов необходимо выполнить взаимосвязанные полевые и цепные расчеты в пространственно-временной области с учетом нелинейных свойств материала (ферромагнитного сердечника). В качестве расчетного инструмента предполагается использовать программу полевого моделирования COMSOL Multiphysics, имеющего настраиваемую интерфейсную связку с модулями, позволяющими выполнять расчеты

электрической цепи, например, при помощи встроенного модуля SPICE или программы Matlab+Simulink.

Для отладки методики расчета и вычислительного алгоритма выполнены исследования расчета переходных процессов в нелинейной индуктивности на основе различных вычислительных алгоритмов, например, в программе Simulink вычисление может производиться по схеме с интегрированием

$$(1) \rightarrow U_L = E - i \cdot R \rightarrow \psi = \int_{t_0}^{t_{\max}} U_L dt \rightarrow \Phi = \frac{\psi}{n} \rightarrow \dots$$

$$\dots \rightarrow B = \frac{\Phi}{St} \rightarrow H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} \rightarrow i = \frac{H \cdot lt}{n} \rightarrow (1),$$

или по схеме с дифференцированием

$$(2) \rightarrow H = \frac{I \cdot n}{lt} \rightarrow B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H \rightarrow \Phi = B \cdot St \rightarrow \dots$$

$$\dots \rightarrow \psi = \Phi \cdot n \rightarrow U_L = \frac{d\psi}{dt} \rightarrow I = \frac{E - U_L}{R} \rightarrow (2),$$

где U_L – напряжение на катушке индуктивности, E – ЭДС источника напряжения, i – сила тока, R – активное сопротивление катушки индуктивности, ψ – потокосцепление, Φ – магнитный поток, n – количество витков катушки, B – магнитная индукция, St – площадь поперечного сечения магнитопровода, H – вектор напряженности магнитного поля, μ – магнитная проницаемость стали магнитопровода, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, lt – длина магнитопровода.

Для исследования алгоритмов расчета в программе Simulink выбран тороидальный сердечник прямоугольного сечения с идеально-равномерно распределенной обмоткой, что позволило исключить поля рассеяния и выполнить сравнительный анализ комбинированного алгоритма расчета (полевой и цепного) с расчетом на основе теории магнитных цепей. Исследования переходных процессов выполнены по схеме с интегрированием и дифференцированием как для коммутации на постоянном токе, так и на переменном. В модели с дифференцированием при постоянном и синусоидальном приложенном напряжении, сдвинутом по фазе, сила тока в начальный момент времени изменяется скачком, что противоречит первому закону коммутации. Однако полевую модель COMSOL можно подключить к Simulink только по схеме с дифференцированием. В этом случае, при использовании нелинейризованного статического блока полевой модели COMSOL совместно с Simulink решения не сходятся.

При использовании встроенного программного модуля SPICE (программы Comsol) и при соответствующей настройке решателя, можно достичь удовлетворительной вычислительной устойчивости. Однако,

надо отметить, что сам модуль обладает ограниченными возможностями по сравнению с Simulink, неудобен для разработки больших схем, использует текстовый формат описания цепи.

Авторами в программах Matlab+Comsol разработан и реализован алгоритм расчета переходного процесса в нелинейной индуктивности, который в сокращенном виде можно представить в следующей последовательности.

1. Вычисление начального приближения значения силы тока на k -ом временном шаге по формуле:

$$i_k^{(0)} = i_{k-1} + \frac{E - i_{k-1} \cdot R}{L_k^{(0)}} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где $L_k^{(0)}$ – начальное приближение индуктивности катушки.

2. Вычисление нового значения индуктивности катушки.
3. Вычисление потокосцепления по формуле

$$\Psi_k = L_k \cdot I_k. \quad (2)$$

4. Вычисление невязки по потокосцеплению по формуле

$$\Delta \Psi_{\text{невязка}} = \Psi_k - \Psi_{k-1} - (E - i_k \cdot R) \cdot \Delta t. \quad (3)$$

5. Вычисление нового приближения силы тока на k -ом временном шаге по формуле

$$i_k^{(1)} = i_k^{(0)} - \frac{\Delta \Psi_{\text{невязки}}}{L_k^{(1)}}. \quad (4)$$

6. Вычисление невязки по силе тока.

7. Если невязка по силе тока превышает заданную погрешность, то вычисления повторяются с пункта 2, иначе вычисления прекращаются.

Разработанный алгоритм расчета планируется использовать для выполнения исследований феррорезонансных явлений в измерительных трансформаторах напряжения.

Литература

1. Лебедев В.Д. Исследование антирезонансного трансформатора напряжения 220 кВ на основе математического моделирования. Сравнительный анализ конструкций / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков // Вестн. ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 25–28.

Технические решения по созданию и использованию цифровых измерительных преобразователей

Технический прогресс в электроэнергетике привел к разработке и внедрению на подстанциях энергосистем России микропроцессорных систем РЗ и ПА, учёта, РАС, АИИС КУЭ и других систем.

На новых и реконструируемых подстанциях вся информация циркулирует в цифровой форме, за исключением потоков метрологической информации о мгновенных значениях первичных токов и напряжений в высоковольтном оборудовании, которые остались аналоговыми.

Объём аналоговых вторичных цепей 1 А (5 А), 100 В значительно возрос, увеличиваются требования к точности трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН).

Недостатки высоковольтных ТТ и ТН известны. Это насыщение магнитопровода и недостаточная точность ТТ, феррорезонанс в индуктивных ТН, недостаточная точность и стабильность ёмкостных ТН.

Опыт эксплуатации микропроцессорных защит (МП РЗ) показал, что процент правильных действий при авариях практически остался на уровне электромеханических РЗ. Вероятнее всего причина этого находится вне МП РЗ, а именно в электромагнитном ТТ, который трансформирует первые периоды аварийного тока короткого замыкания с погрешностями до 90 %, из-за насыщения магнитопровода апериодической составляющей.

Разработка и внедрение интеллектуального высоковольтного оборудования с диагностикой и мониторингом высоковольтной изоляции имеет очевидные технико-экономические перспективы, т.к. позволяет внедрять «цифровые» автоматизированные подстанции без обслуживающего персонала с ремонтом по состоянию, а не по аварийной необходимости.

Разработка и внедрение интеллектуальных высоковольтных цифровых трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН) обеспечит более точный учёт электроэнергии на оптовом рынке, повышение процента правильных действий РЗ и ПА за счёт первичного преобразования без искажений всего спектра тока КЗ, включая апериодическую составляющую [1].

В международном стандарте IEC 60044– 8 показаны преимущества по точности цифровых вторичных цепей, включая ЦТТН, по сравнению с традиционными аналоговыми вторичными цепями для задач коммерческого учёта электроэнергии в рамках АИИС КУЭ.

Полная погрешность коммерческого и технического учёта электроэнергии на оптовом рынке по ВЛ 110-220 кВ при внедрении цифро-

вых ТТ и ТН составит 0.2 %, что почти в 4÷10 раз точнее существующих систем.

Цифровые вторичные цепи – стратегическое техническое решение, обеспечивающее метрологию и надежность работы автоматизированных подстанций.

Цифровые вторичные цепи – это цифровые ТТ и ТН, средства доставки потребителям цифрового потока метрологической информации, включая шину процесса по IEC 61850-9.2 LE. Шина процесса как элемент системы связи между первичным и вторичным оборудованием на подстанции обязана решать весьма разные задачи. Шина процесса должна обеспечивать:

1. передачу цифрового потока метрологической информации с мгновенными значениями токов и напряжений в первичных цепях оборудования ОРУ от всех интеллектуальных электронных устройств (цифровых ТТ и ТН) системам учёта, защиты, автоматики и управления без ухудшения погрешностей по току (напряжению) и углу;

2. передачу информации о состоянии высоковольтного оборудования;

3. передачу дискретных сигналов управления высоковольтным оборудованием;

4. мониторинг высоковольтной изоляции и технологических параметров с целью определения степени деградации оборудования и необходимости восстановительного ремонта по текущему техническому состоянию оборудования.

Важно, внедряя цифровые ТТ и ТН на цифровые подстанции, придерживаться проверенного практикой и закреплённого в ПУЭ и IEC 61850-3 принципа надежности: «системы измерений, учёта и РЗА на каждом присоединении должны функционировать независимо от состояния и работоспособности других присоединений и систем на подстанции».

Метрологические нормы должны обеспечиваться на всем протяжении следования передаваемой информации начиная от первичного провода до входов в системы учёта, измерений, РЗА, РАС и др. Наиболее подходит радиальная структура организации информационных потоков на цифровой подстанции по методу точка-точка. Цифровые вторичные цепи между измерительными преобразователями тока и напряжения (ИПТН) и процессором РЗА или АСКУЭ не должны содержать серверов, коммутаторов, маршрутизаторов, а должны быть организованы на физическом уровне межпроцессорного обмена по IEC 61850-9.2 LE, без задержек и без снижения надежности.

Литература

1. **Гречухин В.Н.** Стратегия и технические решения по обеспечению цифровыми ТТ и ТН метрологической надежности систем РЗА и учёта электроэнергии на подстанциях 110–220 кВ / В.Н. Гречухин, В.Д. Лебедев, М.А. Гречухин // Релейная защита и автоматика. – 2012. – № 3. С. 16-20.

Методика расчета волновых переходных процессов, инициируемых повреждениями на многопроводной линии электропередачи

Разработка волновых алгоритмов определения места повреждения (ОМП) требует наличия адекватной модели линии. На основе такой модели необходимо получить сигналы не только установившегося нормального режима, но и переходного (аварийного) режима. Установившийся аварийный режим повреждения обычно не представляет интереса для волнового ОМП.

Установившийся нормальный режим рассчитывается на основе решения уравнений, описывающих длинную линию. Эти уравнения обычно решаются в частотной области относительно напряжения в виде суммы двух слагаемых. Ток может быть определен через характеристическую проводимость линии аналогично решению для напряжения также в виде суммы двух слагаемых.

Постоянные интегрирования уравнений длинной линии находятся из граничных условий (см. рис. 1), например, начала линии:

$$\dot{i}_{\text{системы}} = [\underline{Z}_{\text{системы}} + \underline{Z}_{\text{входное}}]^{-1} \cdot \dot{E}_{\text{системы}}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{\text{системы}} = \dot{E}_{\text{системы}} - \underline{Z}_{\text{системы}} \cdot \dot{i}_{\text{системы}}. \quad (2)$$

Особенностью определения граничных условий для многопроводной линии является необходимость согласования нескольких координатных систем при расчете матричного входного сопротивления линии.

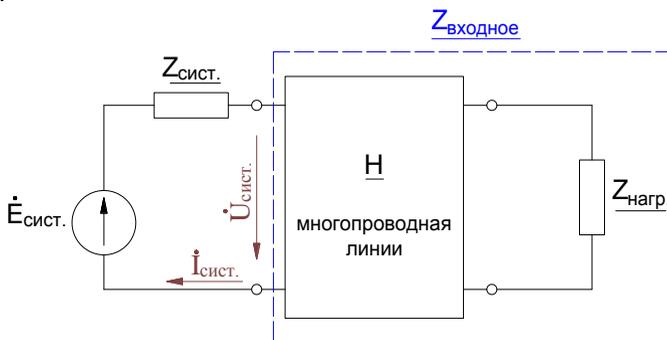


Рис. 1. Установившийся режим

Параметры эквивалентированной системы обычно задаются в координатной системе симметричных составляющих. Вторичные параметры линии определяются в модальной системе координат [5, 3]. Согласовать эти координатные системы можно с помощью перехода в фазную систему координат.

Кроме того, если частотная зависимость параметров линии определяется расчетным путем, то для прилегающей эквивалентированной системы такая зависимость практически всегда не известна. Приходится производить перерасчет имеющихся данных промышленной частоты [с допущением линейной зависимости индуктивного сопротивления от частоты].

Причиной, по которой требуется производить расчет параметров системы на широком диапазоне частот, является необходимость расчета отраженных от шин волн. Волны такой природы используются для ОМП в случаях, когда сигнал земляного канала достаточно мал (междуфазные КЗ, грунты с малой проводимостью).

В данной работе рассматриваются эквивалентированная система и нагрузка, соединенные между собой многопроводной линией. Входное сопротивление рассчитывается со стороны питающей системы по выражению

$$\underline{Z}_{\text{входное}} = \left[\underline{T}_U \cdot \underline{C} + \underline{Z}_{\text{нагр}} \cdot \underline{T}_I \cdot \underline{S} \cdot \underline{Y}_{\text{см}} \cdot \underline{T}_U^{-1} \right]^{-1} \cdot \left[\underline{Z}_{\text{нагр}} \cdot \underline{T}_I \cdot \underline{C} + \underline{T}_U \cdot \underline{S} \cdot \underline{Y}_{\text{см}}^{-1} \cdot \underline{T}_I^{-1} \right], \quad (3)$$

где $\underline{C} = \text{diag}(ch[\underline{\gamma} \cdot L])$; $\underline{S} = \text{diag}(sh[\underline{\gamma} \cdot L])$; L – длина линии; $\underline{\gamma}$ – постоянная распространения; $\underline{Y}_{\text{см}}$ – модальная характеристическая проводимость; \underline{T}_U – матрица фазо-модального перехода по напряжению; \underline{T}_I – матрица фазо-модального перехода по току.

В случае линии, соединяющей две эквивалентированные системы, задача расчета волнового процесса на первом этапе разделяется на две подзадачи.

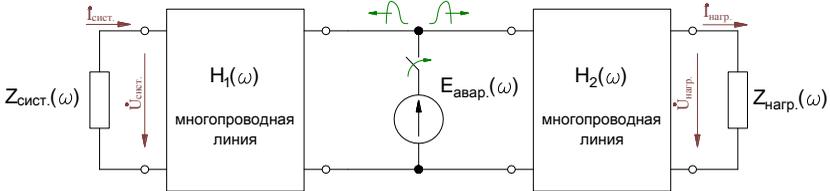


Рис. 2. Аварийный волновой процесс

Аварийный режим определяется на основе расчета установившегося нормального режима методом наложения. Каждому виду повреждения будут соответствовать специфические граничные условия.

В данной работе рассматриваются повреждения без переходного сопротивления в месте повреждения. При необходимости, его можно учесть.

После того как определены граничные условия установившегося режима в месте повреждения (рис. 2), производится расчет. непосредственно волнового процесса.

Литература

1. Токарев С.Ю. Современные тенденции в расчетных моделях многопроводных ЛЭП / С.Ю. Токарев, В.Д. Лебедев // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. трудов восьмой международной науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. В 3 томах. т.2. Смоленск: МЭИ (СФ), 14-15 апреля 2011. – С. 77-80
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1975. п 18-3.
3. Токарев С.Ю. Уравнения многопроводной линии: практический подход / С.Ю. Токарев, В.Д. Лебедев // Энергия-2011: мат. шестой региональной науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. В 3 томах. т.3. Иваново: ИГЭУ, 2011. – С. 134-136.
4. Мыльников В.А. Статистический анализ параметров энергосистем по показаниям фиксирующих приборов // Сб. докладов научного семинара по электротехнике и прикладной математике, – Иваново, 2001. – С.45-51.
5. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин – М.: Энергия, 1973.– п 2.4.
6. Shenkman A.L. Transient analysis of Electric power circuits handbook. – Springer 2005. – п.7.4.3.
7. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы: учебник – М.: Энергия, 1970. – С. 315-322.
8. Токарев С.Ю. Применение обратного преобразования Лапласа для расчета переходных волновых процессов в многопроводных системах / С.Ю. Токарев, В.Д. Лебедев // Энергия-2012: материалы седьмой региональной науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 томах. т.3. Иваново: ИГЭУ, 17-19 апреля 2012, – С. 216-217.

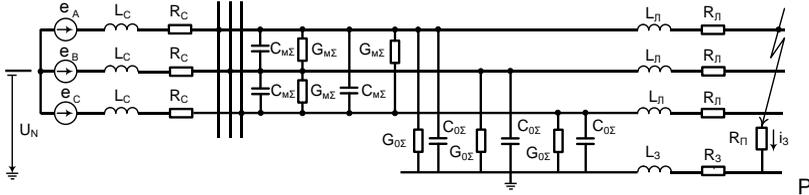
Особенности применения двухчастотной схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ

Введение. Необходимость в анализе переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в электрических сетях 6-10 кВ возникает при решении задач, связанных с оценкой параметров и соотношений переходных токов и напряжений, используемых для действия защит от данного вида повреждений, реагирующих на переходный процесс; исследованием влияния переходных процессов на устойчивость функционирования защит от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима (промышленной частоты, высших гармоник, «наложенных» токов»); определением места (зоны) повреждения на ЛЭП; исследованием перенапряжений в сетях 6-10 кВ и др. Наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей (схем замещения) электрической сети и имитационного моделирования на ЭВМ с применением более точных и, соответственно, более сложных моделей сети и ее элементов. Поэтому задача совершенствования упрощенных аналитических методов решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в рассматриваемых сетях актуальна.

Расчет переходных процессов при ОЗЗ с использованием двухчастотной схемы замещения сети 6-10 кВ. В переходном процессе при ОЗЗ условно различают две стадии, соответственно связанные с разрядом емкости поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз. В сетях радиальной конфигурации зарядная стадия характеризуется наличием в переходных токах и напряжениях одной частотной составляющей, разрядная стадия при близких к шинам ОЗЗ носит явно выраженный волновой характер, а при удалении места ОЗЗ от шин – многочастотный характер. В [1] на основе исследований, проведенных на физической модели сети, учитывающий распределенный характер параметров линий, показано, что уже при относительно небольших удаленностях места ОЗЗ от шин в разрядном токе, как и в зарядном, доминирует одна частотная составляющая, что позволяет применить для расчета обеих составляющих двухчастотную схему замещения (рис. 1).

Исследования переходных процессов при ОЗЗ, выполненные на математических моделях в системе Matlab, учитывающих реальную конфигурацию кабельных сетей 6-10 кВ промышленного и городского электроснабжения и распределенный характер параметров линий, показали, что схема замещения по рис. 1 позволяет с достаточной

точно рассчитать переходный ток только при ОЗЗ в конце линий, но не в промежуточных точках сети, т.к. не учитывает влияние емкостей элементов, расположенных за местом пробоя изоляции.



ис. 1. Двухчастотная схема замещения радиальной сети 6-10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ

Схема замещения для расчета переходных процессов при ОЗЗ в промежуточной точке линии. Для учета влияния на разрядную составляющую переходного тока емкостей элементов, расположенных за местом пробоя изоляции, при ОЗЗ в промежуточных точках линии можно применить схему замещения, приведенную на рис. 2. Ток переходного процесса при ОЗЗ в схеме по рис. 2 содержит три частотных составляющих (зарядную и две разрядных), поэтому схема замещения может быть названа трехчастотной.

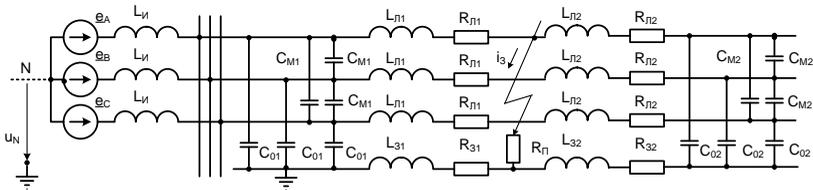


Рис. 2. Трехчастотная схема замещения радиальной сети 6-10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ в промежуточной точке линии

Переходный процесс при ОЗЗ в схеме по рис. 2 описывается дифференциальным уравнением 6-го порядка, поэтому даже упрощенное его решение (например, для случая "малых потерь" в контуре нулевой последовательности, когда можно пренебречь влиянием затухания на частоту свободных колебаний) весьма громоздко.

Анализ на математических моделях кабельных сетей 6-10 кВ реальной конфигурации, выполненных в системе моделирования Matlab, показал, что дополнительные частотные составляющие, обусловленные влиянием емкостей линии и других элементов, расположенных за местом пробоя, приводят к "зашумлению" основной разрядной составляющей высокочастотными разрядными составляющими, имеющими частоту порядка десятков и сотен килогерц (например, рис. 3).

Практически в устройствах защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, использу-

ется спектр частот в диапазоне до 345 кГц, в котором сосредоточено более 90 % энергии сигнала. Составляющие с частотами выше указанной не оказывают также существенного влияния на работу устройств защиты, основанных на использовании различных составляющих установившегося тока ОЗЗ, на максимальные перенапряжения при дуговых перемежающихся замыканиях на землю и на интегральное значение тока в месте повреждения. Поэтому при решении практически всех указанных выше задач, связанных с расчетами токов переходного процесса при ОЗЗ, высокочастотными составляющими разрядного тока, кроме основной частотной составляющей тока разряда, как правило, можно пренебречь.

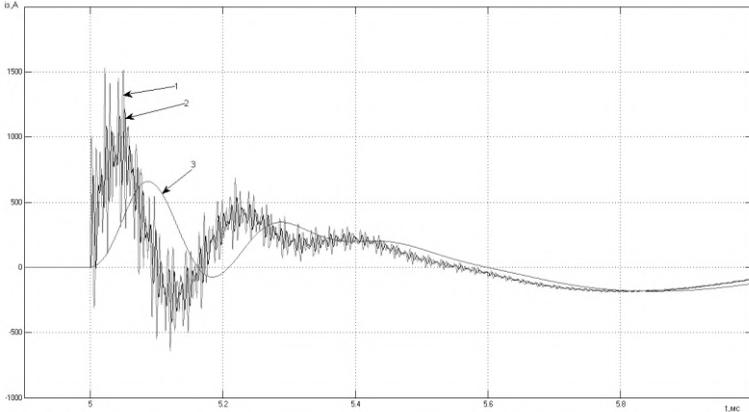


Рис. 3. Ток переходного процесса при ОЗЗ в промежуточной точке кабельной линии 6 кВ с распределенными параметрами: 1 – переходный ток в месте ОЗЗ; 2 – сигнал, пропущенный через ФНЧ с частотой среза 100 кГц; 3 – сигнал, пропущенный через ФНЧ с частотой среза 5 кГц

Анализ результатов вычислительных экспериментов, выполненных на моделях кабельных сетей 6-10 кВ реальной конфигурации в системе Matlab, показал, что частота и амплитуда основной составляющей разрядного тока определяется емкостями сети и продольными параметрами поврежденной линии на участке от шин центра питания (ЦП) до места повреждения (C_{01} и C_{M1} , $L_{л1}$, $L_{з1}$, $R_{л1}$, $R_{з1}$). Однако емкости C_{02} , C_{M2} , расположенные за местом ОЗЗ, должны учитываться при расчете зарядной и принужденной составляющих. Это позволяет использовать для расчета основной разрядной и зарядной составляющих двухчастотную схему замещения по рис. 1. При расчете основной разрядной составляющей в двухчастотной схеме замещения по рис. 1 принимается: $C_{0\Sigma} = C_{01}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1}$, $L_{л} = L_{л1}$, $L_{з} = L_{з1}$, $R_{л} = R_{л1}$, $R_{з} = R_{з1}$. При расчете зарядной и принужденной составляющих $C_{0\Sigma} = C_{01} + C_{02}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1} + C_{M2}$. Такой подход к расчету разрядной и зарядной составляющих позволяет также приближенно учесть зависимость продольных

параметров поврежденной линии от частоты основной разрядной и зарядной составляющих.

Решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ для двухчастотной схемы замещения с использованием метода симметричных составляющих приведено в [1].

Литература

1. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.

УДК 658.262

Т.Н. НЕКРАСОВА, аспирант
(КГУ им. Н.А. Некрасова), г. Кострома

Выбор модели оценки количества заявок на технологическое присоединение к электрическим сетям

Технологическое присоединение (ТП) потребителей к электрическим сетям – один из основных бизнес-процессов (БП) любой распределительной сетевой компании (РСК) – в настоящее время является одним из наиболее проблемных вопросов как для потенциальных и действующих потребителей электрической энергии, так и для РСК. В первую очередь это выражается в нарушении регламентированных сроков выполнения заявок по ТП. Проведенный анализ [1] показал, что одной из причин того, что при выполнении работ не соблюдаются их сроки, в том числе является неэффективность существующей системы планирования и распределения требуемых материальных, финансовых, человеческих и др. ресурсов. Так, например, при выполнении работ силами РЭС приобретение необходимых материалов начинается уже после заключения договора на ТП. Это неизбежно влечет за собой временные потери на приобретение и доставку материалов и тем самым сокращение времени на выполнение работ. Решить эту проблему можно через выведение соответствующих действий из бизнес-процесса так, как это делается, например, при реализации технологических процессов с использованием подхода SMED [2]. Применительно к условиям ТП реализация указанных принципов возможна через формирование мобильного запаса материалов.

При этом возникает задача планирования размеров мобильного запаса для каждой районной электрической сети с учетом множества факторов, включая сезонность поступления заявок на ТП. Решить эту задачу

возможно с использованием математической модели в виде системы массового обслуживания [3].



Рис. 1. Структура СМО системы технологического присоединения

Параметры полученной модели определялись через статический анализ фактических данных, собранных соответствующими службами филиала ОАО «МРСК Центра» – «Костромаэнерго» в 2008-2012 г.г. Весьма значительный объём этих данных позволяет утверждать, что они представляют собой репрезентативную выборку, обеспечивающую требуемый уровень достоверности и адекватности полученных результатов на основе соответствующих формальных критериев. Полученные модели были дополнительно проверены на достоверность и адекватность через определение таких базовых показателей СМО, как среднее время обработки заявки и среднее количество заявок, находящихся в системе. Проведенный анализ показал, что во всех случаях коэффициент вариации между фактическими и расчетными значениями не превышает 20 %, что говорит о высокой степени достоверности полученных моделей.

Данная модель, в том числе, позволяет оценить среднее количество заявок, поступающих в месяце m , по формуле Литтла:

$$N_n(m) = \mu_z^п(m) * t(m),$$

где $t(m)$ – количество рабочих дней в месяце m .

Таким образом, зная количество поступивших заявок в месяце m и зная среднее количество материалов, людских ресурсов и т.д., которое требуется для выполнения одной заявки, можно определить величину мобильного запаса в данном месяце. Однако подобная модель не позволяет учесть различие последствий, наступающих в случае превышения или уменьшения количества поступивших заявок. Так, в случае, если количество поступивших заявок будет меньше запланированного, то оставшиеся на складе остатки будут использованы для формирования мобильного запаса на следующий месяц, и, соответственно, единственными потерями в таком случае будут лишь складские расходы на хранение материалов. В то же время, если количество заявок будет больше запланированного, это неизбежно повлечет увеличение сроков выполнения заявок вследствие необходимости прове-

дения закупочных процедур для отсутствующих материалов. Это в свою очередь может привести к превышению установленных законом сроков выполнения технологического присоединения и, соответственно, к крупным штрафам со стороны контролирующих организаций.

В этом случае необходимо использовать альтернативные критерии оценки среднего количества поступающих заявок, включая:

- центр тяжести и центр максимумов нечеткого множества, представляющего собой пересечение нечетких ограничений превышения и принижения поступающих заявок;

- оценка суммарного риска по критериям Байеса, Лапласа и Сэвиджа от возможных отклонений от запланированного значения. В этом случае, вероятность (риск) того, что в месяце m поступит k заявок определялась по формуле Эрланга для потока Пуассона.

Результаты сравнения всех показателей приведены в табл. 1. Для расчетов использовались следующие показатели: интенсивность входного потока $\mu^{\text{н}}_3(m) = 15$; количество рабочих дней в месяце $m = 24$.

Полученные результаты моделирования показывают, что в случае равенства потерь при превышении и принижении допустимых значений, все критерии дают схожие результаты. Однако в случае различия величины потерь, а также в случае несимметричности допусков использование формулы Литтла становится нецелесообразным. В этом случае целесообразно использовать в зависимости от стратегии РСК критерий Байеса (средняя оценка) или критерий Лапласа (пессимистичная оценка). Также можно использовать нечеткую модель с оценкой среднего на основе центра тяжести, которая позволяет создать некоторый дополнительный запас материалов.

Таблица 1. Оценка среднего количества заявок на технологическое присоединение к электрическим сетям в месяце m

Показатель	1	2	3
Допустимое отклонение от среднего в случае уменьшения количества заявок	20 %	20 %	20 %
Допустимое отклонение от среднего в случае увеличения количества заявок	20 %	20 %	10 %
Цена за каждую заявку в случае уменьшения количества заявок ниже допустимого	100	100	100
Цена за каждую заявку в случае увеличения количества заявок выше допустимого	100	1000	1000
Оценка среднего по формуле Литтла	360	360	360
Оценка среднего на основе центра максимумов	365	365	380
Оценка среднего на основе центра тяжести	376	376	390
Оценка среднего по критерию Байеса	363	369	388
Оценка среднего по критерию Лапласа	368	379	412
Оценка среднего по критерию Сэвиджа	364	379	411

Литература

4. **Денисов А.Р.** Синтез и анализ модели «как есть» бизнес-процесса «Технологическое присоединение к электрическим сетям» /А.Р. Денисов, М.Г. Левин, А.В. Рыбинский, Т.Н. Некрасова // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. – 2012. – т.18. – № 1. – С. 37–40.
5. **Синго С.** Быстрая переналадка: Революционная технология оптимизации производства. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2006.
6. **Денисов А.Р.,** Левин М.Г., Некрасова Т.А. Статистический анализ потока заявок на технологическое присоединение к электрическим сетям // Theory and practice in the physical, mathematical and technical sciences: materials digest of the XXIV International Scientific and Practical Conference and the I stage of Research Analytics Championship in the physical, mathematical and technical sciences. – London: IASHE, 2012. – P. 51–55

УДК 628.95

С.В. МИТРОФАНОВ, к.т.н., доцент,
К. Р. ВАЛИУЛЛИН, студент
(ОГУ), г. Оренбург

Регулятор уличного освещения

Значительную долю энергопотребления в бытовом секторе составляет потребление электрической энергии на нужды освещения [1]. Возможны два варианта проведения энергосберегающих мероприятий. Первый – замена ламп на более эффективные – в настоящий момент внедряется повсеместно. Второй – разработка интеллектуальных систем управления освещением, которая в настоящий момент не столь распространена. При разработке подобных систем основной задачей становится разработка алгоритмов работы осветительных приборов в зависимости от внешних условий. Подобная система должна обеспечивать необходимый уровень освещенности при минимальном энергопотреблении.

Одним из наиболее очевидных вариантов применения «умных» систем является область наружного освещения. В настоящее время для уличного освещения используются лампы ДРЛ-250, ДНаС 210, ДНаТ [2]. Включение освещения осуществляется либо вручную оператором, либо автоматически по таймеру. Оба этих варианта далеко не оптимальны и часто встречаются ситуации, когда фонари горят в светлое время суток, либо выключены, несмотря на темноту. Кроме того, подобные лампы не допускают возможности регулирования яркости и потребления электрической энергии. В настоящий момент, на замену дугоразрядным лампам приходят светодиодные уличные фонари, имеющие намного более низкий уровень энергопотребления и в тоже время большую стойкость к повреждениям и значительно больший срок службы [3]. Методы регулирования таких фонарей остаются прежними. Яркость светодиодного фонаря можно регулировать дискретно – включением или отключением

определенного числа кристаллов. Срок службы светодиодов при этом остается прежним.

На рис. 1 предлагается разработанная нами схема регулятора уличного освещения. На схеме $U_{вх}$ – входное напряжение, поступающее с оптического датчика, и являющееся функцией от уровня освещенности. В роли оптического датчика может выступать любой фотоэлемент. Основное требование к датчику – линейная зависимость выходного напряжения от уровня освещенности в рабочем диапазоне. Резисторы R1-R3 регулируют ток базы каждого из транзисторов VT1-VT3. Тогда по основным уравнениям транзистора [4]:

$$I_{Бн} = \frac{U_{ex}}{R_n + R_{БЭн}}, \quad (1)$$

где $R_{БЭн}$ – сопротивление открытого перехода база-эмиттер.

$$I_{Кн} = h_{21э} \cdot I_{Бн} + (h_{21э} + 1) \cdot I_{КО}, \quad (2)$$

$h_{21э}$ – статический коэффициент передачи тока и $I_{КО}$ – обратный ток коллектора, являются постоянными параметрами транзистора, поэтому примем $K = (h_{21э} + 1) \cdot I_{КО}$ – постоянная, зависящая от характеристик используемых транзисторов. Преобразуем (2) с учетом данного допущения и уравнения (1)

$$I_{Кн} = h_{21э} \cdot \frac{U_{ex}}{R_n + R_{БЭн}} + K.$$

Если принять вольт-люксовую характеристику фотоэлемента прямой, описанной по закону $U_{ex}(L) = k \cdot L$, где L – освещенность в люксах, то:

$$I_{Кн}(L) = \frac{k \cdot h_{21э}}{R_n + R_{БЭн}} \cdot L + K.$$

Зная параметры транзистора, можно подобрать резисторы R1-R3 таким образом, чтобы реле К1-К3 сработали при заранее определенных уровнях освещенности L и отключали соответствующие светодиоды HL1-HL3 (рис. 2). В общем случае это может быть группа светодиодов, включенных последовательно. Таким образом, при достижении определенного уровня освещенности, сработает реле К1 и отключит часть светодиодов. При дальнейшем повышении освещенности, срабатывает реле К2 и отключает еще одну часть светильника. При достижении максимального уровня освещенности срабатывают все реле и светильник отключается. При затемнении логика работы устройства обратная. Кроме того, данная схема может быть доработана для использования совместно с датчиками движения и/или звука. Наибольший экономический эффект применение подобных датчиков может быть достигнут при использовании в фонарях, установленных на ули-

цах с малой проходимостью в ночное время, например, в частном секторе.

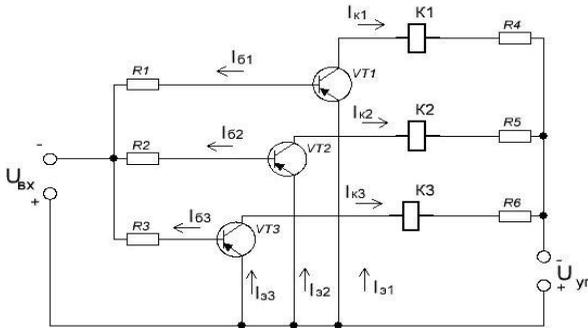


Рис. 1. Схема регулятора уличного освещения

В схеме рис. 2 K4 – нормально разомкнутый контакт реле, работающего от датчика звука. В данной схеме часть светодиодов будет гореть при отсутствии движения как дежурное освещение. При поступлении сигнала от датчика движения замкнется контакт K4 и обеспечит возможность подстройки освещения под заданный уровень. Работоспособность схемы проверена в MatLab Simulink.

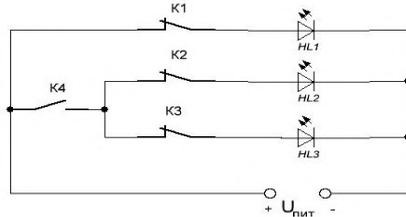


Рис. 3. Схема контактов включения регулятора при использовании датчика движения

Литература

1. Эннс О. Интеллектуальные системы уличного освещения / О. Эннс // Энергосбережение, – 2008. – № 1. – С. 58-62.
2. Модернизация систем уличного освещения [Электронный ресурс]. офиц. сайт «ЭнергоСовет», портал по энергосбережению. – Режим доступа: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=8
3. Галушак В.С. Стратегия развития энергообеспечения в уличном освещении / В.С.Галушак, А.Г.Сошинов, И.И.Артюхов, Г.Г.Угаров // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5 – С. 162-164.
4. Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. — С. 53-68. — ISBN 978-5-7695-5898-6.

А.Л. КУЛИКОВ, д.т.н.,
В.А. ФАЛЬШИНА, аспирант
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева) г. Нижний Новгород

Анализ алгоритмов оценки параметров электрических сигналов в условиях изменения частоты

Измерение параметров электрических сигналов промышленной частоты, как правило, осуществляется на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ). При изменениях частоты ДПФ приводит к результату с ошибками[1], которые устраняются путем введения переменного окна данных M , а само преобразование принимает вид:

$$y(n) = \frac{2}{M} \sum_{i=0}^{l-1} x(i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{M}\right);$$

$$y_{\perp}(n) = -\frac{2}{M} \sum_{i=0}^{l-1} x(i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{M}\right),$$
(1)

где $x(i)$ – действительные входные отсчеты сигнала промышленной частоты; i, n – номер отчета.

Частыми являются случаи, когда отношение между реальной промышленной частотой f_m и частотой дискретизации f_s не является целым числом: $L = M + \delta = f_s / f_m$ (табл. 1).

Таблица 1. Отношение между L и f_m

а) $f_s=4$ кГц											
L	45	46	47	48	49.383	50	50.63	52	53	54	55
f_m	88.9	86.96	85.1	83.3	81	80	79	76.9	75.5	74.1	72.7
б) $f_s=1$ кГц											
L	45	46	47.6	48	49	50	51	52	52.6	54	55
f_m	22.2	21.7	21	20.8	20.4	20	19.6	19.2	19	18.5	18.2

В[2] предлагается модифицированный алгоритм ДПФ, комплексный вид которого соответствует выражению:

$$\bar{y}_{\text{ДПФ}}(n) = \bar{P}(n) - \bar{N}(n),$$
(2)

где

$$\bar{P}(n) = \frac{1}{L} \left(x(0) + x(M) + 2 \sum_{i=1}^{M-1} x(i) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{M} i} \right);$$
(3)

$$\bar{N}(n) = \frac{1}{6 \cdot L} \left(x(M) - x(M-1) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{M}(M-1)} + x(1) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{M}} - x(0) \right). \quad (4)$$

При расчетном окне данных L вводят дополнительную коррекцию вида:

$$\bar{K}(n) = \frac{\delta}{2L} \left[(x(M) + (x(M+1) - x(M))\delta) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{M}L} + x(M) \right], \quad (5)$$

а окончательное выражение цифровой фильтрации с учетом дробного окна данных равно

$$\bar{y}_{\text{дпф}}(n) = \bar{y}_{\text{дпф}}(n) + \bar{K}(n). \quad (6)$$

Производился анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) цифровых фильтров (рис. 1, а), выполненных по алгоритмам:

- 1 обычное ДПФ по выражению (1);
- 2 обычное ДПФ по выражениям (1) ÷ (5);
- 3 $\bar{P}(n)$;
- 4 $\bar{P}(n) + \bar{K}(n)$;
- 5 $\bar{y}_{\text{дпф}}(n)$;
- 6 $\bar{y}_{\text{дпф}}(n)$

при $f_s=1\text{кГц}$; $f_m=49\text{Гц}$, т.е. $\delta = 0,408$ и $M=20$.

Дополнительно моделировалась фильтрация по вышеуказанным алгоритмам (рис. 2) сигнала вида:

$$x(i) = \begin{cases} 2 \cos \left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{i}{f_s} \right), & \text{при } 0 \leq i < 0,07 \cdot f_s; \\ 2 \cos \left(2 \cdot \pi \cdot 49 \cdot \frac{i}{f_s} + 7,2^\circ \right), & \text{при } i \geq 0,07 \cdot f_s. \end{cases} \quad (7)$$

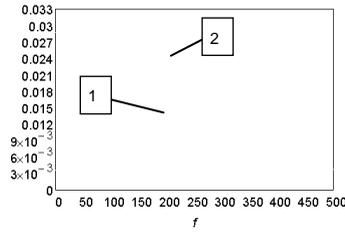
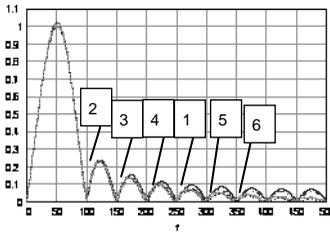


Рис. 1. АЧХ алгоритмов: а) 1+6; б) $\bar{N}(n)$ (кривая 1), $\bar{K}(n)$ (кривая 2)

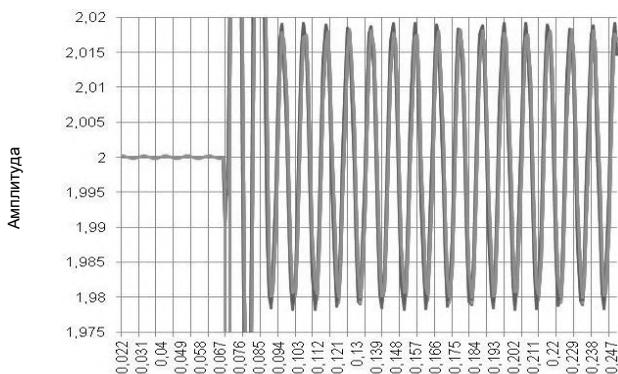


Рис. 2. Расчет амплитуды сигнала (7) по алгоритмам1+6

По результатам анализа очевидны следующие выводы:

1. АЧХ фильтров (рис. 1,а) по перечисленным алгоритмам практически одинаковы.

2. Дополнительный алгоритм (выражение (5)) вносит корректирующие поправки в АЧХ фильтров (рис. 1,б), однако требует существенных вычислительных затрат и не является эффективным.

3. Результаты фильтрации (рис. 2) сигнала промышленной частоты (выражение (7)) свидетельствуют о несущественном повышении точности (0,05 %) за счет введения дополнительного алгоритма(выражение (5)).

4. Слагаемое ДПФ $\bar{N}(n)$ (выражение (2)) вносит дополнительные погрешности даже на частоте 50 Гц (рис. 2 и рис. 1,б). Необходимость использования его в цифровой фильтрации сомнительна.

Таким образом, при выборе вариантов фильтрации сигналов промышленной частоты необходимо проводить предварительное моделирование с получением АЧХ. Часто усложнение алгоритмов ДПФ не приводит к повышению точности оценки параметров сигналов.

Литература

3. **Rebizant W.**, Szafran J., Wiszniewski A. Digital signal processing in power system protection and control. New York: Springer, 2011. 316 p.
4. **Xiaojuan Li.** Estimation of power system frequency, phasors and their applications for fault location on power transmission lines. Energy systems centre the school of electrical, electronic and computer engineering, 2007.

Анализ режимов работы электроэнергетической системы Республики Йемен

Введение. В настоящее время основной системообразующей электрической сетью электроэнергетической системы (ЭЭС) Республики Йемен является и в среднесрочной перспективе останется электрическая сеть напряжением 132 кВ, общая протяженность линий электропередачи которой составляет более 2000 км (рис. 1).

Создаваемая электрическая сеть сверхвысокого напряжения 400 кВ в настоящее время представлена только двумя параллельными линиями длиной 230 км, связывающими новую парогазовую электростанцию Safer (г. Marib) с установленной мощностью 240 МВт и подстанцию 400/132 кВ Bani Hoshesh. Генерирующая часть энергосистемы Республики Йемен включает также 3 ТЭС с установленной мощностью 154 – 165 МВт и несколько дизельных электростанций, выдающих мощность потребителям по электрической сети 132 кВ (рис. 1). Поэтому повышение эффективности функционирования электрической сети 132 кВ в целях повышения ее режимной надежности и качества распределяемой потребителям электроэнергии является актуальной проблемой.

Особенности ЭЭС Республики Йемен. К основным особенностям ЭЭС Республики Йемен (рис. 1) относятся:

- большая протяженность (до 250 и более километров) ВЛ сети 132 кВ;
- относительно небольшая мощность и ограниченное число электростанций в структуре генерирующей части ЭЭС Центра и Юга страны;
- прогнозируемый быстрый рост потребляемой мощности в регионах по п. 2 примерно в 1,5 раза в 2015 г., в 2,5 раза в 2020 г. и в 4 раза в 2025 г.;
- возможность удовлетворения роста электропотребления в регионах страны в перспективе до 2025 г. в основном за счет расширения пущенной в работу в 2010 г. мощной парогазовой электростанции Safer (г. Marib), расположенной на Севере центральной части страны.

Указанные особенности ЭЭС Республики Йемен создают возможность:

- перегрузки связей напряжением 132 кВ;
- возникновения недопустимых отклонений напряжения в узлах до уровней, недопустимых по требованиям к качеству электроэнергии;
- нарушений статической устойчивости.

Целью данного анализа режимов работы ЭЭС Республики Йемен является выявление слабых узлов и связей для разработки способов повышения режимной надежности и качества электроэнергии. Наиболее эффективным методом исследования режимов ЭЭС в настоящее время является моделирование на ЭВМ. В данной работе для моделирования и анализа режимов работы ЭЭС Республики Йемен применялась программа "Энергия", разработанная в ИГЭУ [1].

Математическая модель ЭЭС Республики Йемен в программе «Энергия». Разработанная математическая модель ЭЭС Республики Йемен включает все источники генерирующей мощности (парогазовую электростанцию Safer, все тепловые и дизельные электростанции), ВЛ и все понизительные подстанции напряжением 132 и 400 кВ с нагрузкой, подключенной на низшем напряжении 33 или 11 кВ, обеспечивая возможность расчетов в исследуемых режимах перетоков активной и реактивной мощности, напряжений в узлах, загрузки ЛЭП, потерь активной мощности в элементах сети и др. [2].

Проверка достоверности результатов, полученных с использованием модели, и оценка их точности выполнялась путем сравнения расчетных данных с действительными параметрами реальных режимов, существовавших в ЭЭС Республики Йемен на 03.07.2010 г. и 01.08.2012 г. Сравнение расчетных и действительных значений напряжений в узлах и перетоков мощности по линиям сетей 132 кВ и 400 кВ подтвердило адекватность разработанной модели и достоверность получаемых методом моделирования результатов. Погрешности расчетов напряжений в узлах и перетоков мощности по линиям не превышали 5%.

Прогнозирование роста нагрузки в узлах электрической сети 132 кВ. Для расчета и анализа режимов работы ЭЭС Республики Йемен на основе общего нормального и повышенного прогнозов роста электропотребления в стране на период с 2010 до 2025 г., разработанных Министерством энергетики, были разработаны прогнозы роста электропотребления в отдельных узлах энергосистемы. Сравнение данных прогноза и реальных данных за период 2009-2011 гг. показало, что реальный рост нагрузки соответствует повышенному прогнозу.

Расчетные режимы электростанций и сети 132 кВ. Особенностью режимов работы ЭЭС Республики Йемен является отсутствие явно выраженных максимума и минимума электропотребления в течение года. Максимум электропотребления имеет место в летний период (июль), минимум – в зимний период (декабрь). Различие максимума и минимума электропотребления не превышает 10%.

На ближайшую (до 2015 г.) и среднесрочную перспективу (до 2025 г.) было принято, что в сети 132 кВ в работе находятся все линии,

резерв мощности на электростанциях соответствует сложившимся в энергосистеме страны в период 2010-2012 гг. соотношениям между величиной резерва и установленной мощностью. При анализе учитывались реально возможные ремонтные и аварийные режимы ВЛ сети 132 кВ.

Основные результаты расчетов установившихся режимов сети 132 кВ. На основе расчетов установившихся режимов сети 132 кВ ЭЭС Республики Йемен были выявлены «слабые узлы». В табл. 1 в качестве примера приведены результаты расчетов напряжений в узлах сети 132 кВ в нормальном режиме работы (все линии включены) в период 2010-2014 гг.

Таблица 1. Напряжения в узлах сети 132 кВ ЭЭС Республики Йемен в нормальных режимах в период летнего максимума (июль) 2010-2014 гг.

Узел	Напряжение в узлах по годам, кВ				
	2010	2011	2012	2013	2014
Amran	131	128	127	125	122
Sana	130	127	126	123	120
Dahmar	128	123	124	121	118
Ibb	128	123	122	119	115
Taiz	130	124	124	120	115
Nobat	135	126	124	116	108
Hiswa	141	130	127	118	108
Hodaida	138	135	134	131	129

Из данных табл. 1 можно видеть, что даже в нормальных режимах работы уже в ближайшие годы возможны значительные снижения напряжения в ряде узлов сети 132 кВ (Hiswa, Nobat и др.), которые могут привести к нарушениям статической устойчивости ЭЭС Республики Йемен. В ремонтных и аварийных режимах возникновение нарушений статической устойчивости возможны уже в 2013-2014 гг. Результаты расчетов установившихся режимов приводят к выводу о необходимости разработки методов повышения режимной надежности ЭЭС Республики Йемен.

Литература

1. Кулешов А.И. Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: учеб. пособие / А.И. Кулешов, Б.Я. Прахин // Ивановск. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005.
2. Шуин В.А. Математическая модель для исследования режимной надежности электроэнергетической системы Республики Йемен / В.А. Шуин, А.И. Кулешов, Аль-Хомиди М.С. // сб. науч. тр. межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения) / Ивановск. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – С. 161-163.

Исследование и анализ переходных режимов в целях повышения надежности работы элегазовых выключателей линий электропередачи сверхвысокого напряжения

Актуальность. В соответствии с целевой программой замены воздушных выключателей 330-750 кВ на элегазовые (приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 12.11.2010 г. № 868) на ряде подстанций в цепях линий электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения (СВН) были установлены элегазовые выключатели. Опыт их эксплуатации показал, что при коммутациях на отдельных воздушных линиях (ВЛ) напряжением 500-750 кВ, имеющих шунтирующие реакторы (ШР), (например, ВЛ 500 кВ «ПС Алтай – ПС Экибастузская», ВЛ 750 кВ «Курская АЭС – ПС Новобрянская») были зафиксированы аварии, связанные с повреждением линейных элегазовых выключателей (разрушение дугогасительных камер одной из фаз выключателя).

Анализ этих аварий показал, что повреждения выключателей происходили вследствие длительного горения дуги между разомкнутыми контактами в дугогасительных камерах одной из фаз выключателей, что в свою очередь было обусловлено наличием в отключаемом фазном токе значительной апериодической составляющей. При этом разрушения выключателей происходили как при отключении ЛЭП в режиме холостого хода, так и при отключении короткого замыкания (КЗ) на ЛЭП.

В связи с выше изложенным в целях повышения надежности работы энергосистем являются актуальными исследование и анализ переходных процессов, возникающих при коммутациях реактированных ВЛ СВН элегазовыми выключателями.

В данной статье приведены результаты исследований переходных режимов различных ЛЭП СВН: ВЛ электропередачи 750 кВ «Курская АЭС – ПС Новобрянская – Смоленская АЭС»; ВЛ 500 кВ «Ростовская АЭС – ПС Буденновская»; ВЛ 500 кВ «ПС Шахты – Ростовская АЭС»; ВЛ 330 кВ «ПС Буденновская – ПС Чирюрт».

Цель исследований – выработка рекомендаций по устранению влияния апериодической составляющей тока для улучшения условий работы элегазовых выключателей, устанавливаемых на ВЛ вместо воздушных.

Задачи исследований:

– расчет режимов одностороннего включения ВЛ на холостой ход и оценка величины и длительности существования апериодической составляющей тока (проверка допустимости в указанных режимах быст-

рого отключения ЛЭП, например, при ложном срабатывании основной быстродействующей защиты);

– расчет режимов при отключении ВЛ при неуспешном трехфазном автоматическом повторном включении (ТАПВ) или при включении ЛЭП на существующее КЗ от ключа управления в режиме «опробования» и оценка величины и длительности существования апериодической составляющей тока в поврежденных и неповрежденных фазах при несимметричных КЗ;

– разработка и исследование мероприятий по устранению влияния апериодической составляющей тока для улучшения условий работы линейных элегазовых выключателей в случае наличия длительно незатухающей апериодической составляющей тока в фазах выключателя в режимах одностороннего включения ЛЭП.

Методы и инструментарий исследований. Для решения поставленных задач применялись методы математического моделирования. Расчеты электромагнитных переходных процессов проводились с использованием программы SIMULINK программного комплекса MATLAB.

На рис. 1–4 показаны расчетные однолинейные схемы исследуемых электропередач, составленные на основе паспортов ЛЭП и данных, предоставленных соответствующими филиалами (РДУ) ОАО «СО ЕЭС».

ЛЭП моделировались как линии с распределенными параметрами с учетом марки проводов, типа опор, наличия грозозащитных тросов, транспозиции фаз и др.

Погонные параметры ВЛ определялись исходя из конструкции фазы и расстояний между фазами и между грозозащитными тросами. В табл. 1 приведены основные данные из паспортов ВЛ. Типы шунтирующих реакторов, установленных на ВЛ приведены в табл. 2.

Эквивалентные генераторы энергосистем и станций моделировались как источники ЭДС, последовательно соединенные с сопротивлениями, значения которых выбирались таким образом, чтобы обеспечить соответствие токов КЗ на шинах подстанций и электростанций.

Шунтирующие реакторы в расчетных схемах учитывались ветвями с активным и реактивным сопротивлениями.

Все расчеты выполнены для наихудшего случая, в качестве которого принят момент коммутации выключателя, при котором напряжение на контактах выключателя равно нулю (обеспечение максимального значения амплитуды апериодической составляющей при включении ЛЭП). Кроме того, при рассмотрении режимов с КЗ принято, что переходное сопротивление в месте повреждения равно нулю.

В качестве оценки эффективности мероприятий по ликвидации длительной апериодической составляющей принято требование регулярного перехода отключаемого тока через нулевое значение (промежуток времени между переходами через нуль не более 10 мс) по истечении

40 мс после замыкания контактов выключателя (учитывается время действия основных защит ЛЭП $\sim 40 \pm 50$ мс).

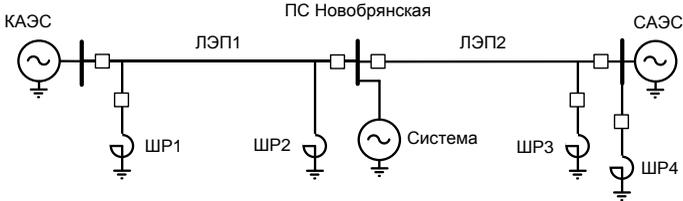


Рис. 1. Расчетная однолинейная схема электропередачи 750 кВ
Курская АЭС (КАЭС) – ПС Новобрянская – Смоленская АЭС (САЭС)
Ростовская АЭС ПС Буденновская

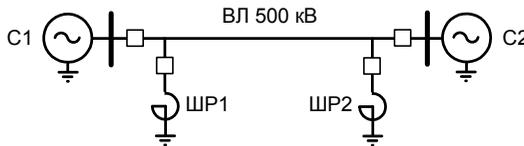


Рис. 2. Расчетная однолинейная схема электропередачи 500 кВ
Ростовская АЭС (РоАЭС) – ПС Буденновская
Ростовская АЭС ПС Шахты



Рис. 3. Расчетная однолинейная схема электропередачи 500 кВ
ПС Шахты – РоАЭС

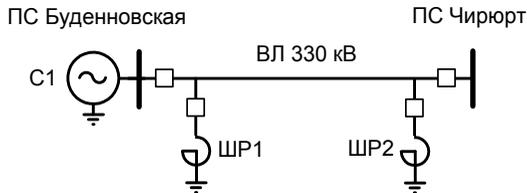


Рис. 4. Расчетная однолинейная схема электропередачи 330 кВ
ПС Буденновская – ПС Чирюрт

Включение ВЛ на холостой ход. Результаты расчетов показали, что при одностороннем включении всех рассматриваемых ВЛ в токе холостого хода присутствует длительно незатухающая апериодическая составляющая. При этом наибольший интервал времени до начала регулярного перехода фазного тока выключателя через нуль составляет:

– при включении ВЛ 750 кВ Курская АЭС – ПС Новобрянская со стороны ПС Новобрянская при наличии включенных шунтирующих реакторов по концам рассматриваемой ЛЭП – 0,46 с;

– при включении ВЛ 750 кВ Смоленская АЭС – ПС Новобрянская со стороны ПС Новобрянская при наличии включенных шунтирующих реакторов на ПС Новобрянская и Смоленской АЭС – 1,06 с;

– при включении ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – ПС Буденновская со стороны ПС Буденновская при наличии шунтирующих реакторов по концам ЛЭП – 0,23 с;

– при включении ВЛ 500 кВ ПС Шахты – Ростовская АЭС со стороны ПС Шахты при наличии включенного ШР на шинах 500 кВ ПС Шахты – 0,95 с;

– при включении ВЛ 330 кВ ПС Буденновская – ПС Чирюрт со стороны ПС Буденновская при наличии включенных шунтирующих реакторов по концам ЛЭП – 0,4 с.

Таблица 1. Основные данные по ВЛ, используемые при моделировании

Наименование ВЛ	Длина, км	Тип опоры	Конструкция фазы	Расстояние между проводами в фазе, м	Марка грозотроса (количество цепей)	Количество транспозиций фазных проводов
КАЭС – ПС Новобрянская	207	П 750-1	5хАС-240/56	0,3	2*АС-70/72; С-70 (2 цепи)	2
ПС Новобрянская – САЭС	131,24	П 750-1	4хАС-500/27	0,6	2*АС-70/72 (2 цепи)	2
РоАЭС – ПС Буденновская	431,932	ПБ-500-5Н	3хАС-330/43	0,4	АЖС-70/39; С-70 (2 цепи)	2
ПС Шахты – РоАЭС	217,4	ПБ-500-5Н	3хАС-330/43	0,4	АЖС-70/39 (2 цепи)	3
ПС Буденновская – ПС Чирюрт	408,711	ПБ-330-7Н	2хАС-300/39	0,4	С-70 (2 цепи)	5

Таблица 2. Шунтирующие реакторы, установленные на ВЛ (рис. 1 - 4)

Наименование ВЛ	Типы шунтирующих реакторов			
	ШР 1	ШР 2	ШР 3	ШР 4
КАЭС – ПС Новобрянская	РОДЦ-110000/750	РОДЦ-110000/750 ²	–	–
ПС Новобрянская – САЭС	–	–	РОДЦ-110000/750	РОДЦ-110000/750
РоАЭС – ПС Буденновская	РОДЦ-60000/500	РОДЦ-60000/500	–	–
ПС Шахты – РоАЭС	РОДЦ-60000/500	–	–	–
ПС Буденновская – ПС Чирюрт	РОДЦ-55000/400 У1	РОДЦ-55000/400 У1	–	–

Примечания: 1. Типы реакторов приведены для однофазного исполнения.
2. В фазе «А» установлен ШР типа РОМБС-110000/750/35 У1.

Следовательно, при одностороннем включении всех рассматриваемых ВЛ на холостой ход при наличии ШР на ЛЭП или на шинах подстанций, к которым подключены ВЛ, возможны повреждения линейных элегазовых выключателей при быстром (например, от релейной защиты) отключении ЛЭП из-за наличия в фазных токах длительно незатухающей аperiodической составляющей.

Одностороннее включение ВЛ в цикле неуспешного ТАПВ. В данном режиме оценивался интервал времени от момента замыкания контактов выключателя до начала регулярного перехода фазного тока через нуль в неповрежденных фазах выключателя ВЛ при различных несимметричных КЗ (точки КЗ выбирались в конце и начале ВЛ). Расчеты выполнялись с учетом возможного отключения ШР по концам ВЛ. Результаты расчетов приведены в табл. 3 - 7 (во всех случаях приведены максимальные значения интервала времени от момента включения до начала регулярного перехода фазного тока через нуль).

Анализ результатов, приведенных в табл. 3 - 7, показывает, что при одностороннем включении рассматриваемых ВЛ при наличии ШР по концам ЛЭП в токах неповрежденных фаз линейного выключателя присутствуют длительно незатухающие аperiodические составляющие.

Таблица 3. Одностороннее включение ВЛ 750 кВ Курская АЭС – ПС Новобрянская со стороны ПС Новобрянская при различных видах КЗ

Вид КЗ	Интервалы времени от момента включения до начала регулярного перехода тока выключателя в неповрежденной фазе через нуль, с					
	ШР по концам ЛЭП в работе		ШР отключен на Курской АЭС		ШР отключен на ПС Новобрянская	
	КЗ у шин Курской АЭС	КЗ у шин ПС Новобрянская	КЗ у шин Курской АЭС	КЗ у шин ПС Новобрянская	КЗ у шин Курской АЭС	КЗ у шин ПС Новобрянская
$K^{(1)}$	0,44	0,48	0,79	1,08	0,45	0,48
$K^{(1,1)}$	0,48	0,5	0,91	1,35	0,65	0,51
$K^{(2)}$	0,5	0,6	0,73	0,95	0,31	0,45

Таблица 4. Одностороннее включение ВЛ 750 кВ Смоленская АЭС – ПС Новобрянская со стороны ПС Новобрянская при различных видах КЗ

Вид КЗ	Интервалы времени от момента включения до начала регулярного перехода тока выключателя в неповрежденной фазе через нуль, с					
	ШР на Смоленской АЭС и ПС Новобрянская включены		ШР отключен на Смоленской АЭС		ШР отключен на ПС Новобрянская	
	КЗ у шин Смоленской АЭС	КЗ у шин ПС Новобрянская	КЗ у шин Смоленской АЭС	КЗ у шин ПС Новобрянская	КЗ у шин Смоленской АЭС	КЗ у шин ПС Новобрянская
$K^{(1)}$	0,74	0,82	< 0,02	< 0,02	0,7	0,76
$K^{(1,1)}$	1,0	0,9	< 0,02	< 0,02	0,86	0,86
$K^{(2)}$	1,64	1,78	< 0,02	< 0,02	1,04	1,36

Таблица 5. Одностороннее включение ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – ПС Буденновская со стороны ПС Буденновская при различных видах несимметричных КЗ

Вид КЗ	Интервалы времени от момента включения до начала регулярного перехода тока выключателя в неповрежденной фазе через нуль, с					
	ШР по концам ЛЭП в работе		ШР отключен на Ростовской АЭС		ШР отключен на ПС Буденновская	
	КЗ у шин Ростовской АЭС	КЗ у шин ПС Буденновская	КЗ у шин Ростовской АЭС	КЗ у шин ПС Буденновская	КЗ у шин Ростовской АЭС	КЗ у шин ПС Буденновская
K ⁽¹⁾	0,23	0,23	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
K ^(1,1)	0,25	0,28	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
K ⁽²⁾	0,23	0,23	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04

Таблица 6. Одностороннее включение ВЛ 500 кВ ПС Шахты – Ростовская АЭС со стороны ПС Шахты при различных видах несимметричных КЗ (ШР на шинах 500 кВ ПС Шахты включен)

Вид КЗ	Интервалы времени от момента включения до начала регулярного перехода тока выключателя в неповрежденной фазе через нуль, с	
	КЗ у шин ПС Шахты	КЗ у шин Ростовской АЭС
K ⁽¹⁾	0,93	0,9
K ^(1,1)	1,01	0,81
K ⁽²⁾	0,84	0,91

Таблица 7. Одностороннее включение ВЛ 330 кВ ПС Буденновская – ПС Чирюрт со стороны ПС Буденновская при различных видах несимметричных КЗ

Вид КЗ	Интервалы времени от момента включения до начала регулярного перехода тока выключателя в неповрежденной фазе через нуль, с					
	ШР по концам ЛЭП в работе		ШР отключен на ПС Чирюрт		ШР отключен на ПС Буденновская	
	КЗ у шин ПС Чирюрт	КЗ у шин ПС Буденновская	КЗ у шин ПС Чирюрт	КЗ у шин ПС Буденновская	КЗ у шин ПС Чирюрт	КЗ у шин ПС Буденновская
K ⁽¹⁾	0,28	0,32	< 0,04	0,27	< 0,04	< 0,04
K ^(1,1)	0,28	0,26	< 0,04	0,35	< 0,04	< 0,04
K ⁽²⁾	0,42	0,45	0,21	0,21	< 0,04	< 0,04

Таким образом, при наличии ШР по концам ЛЭП при плановом ее опробовании или включении ВЛ в цикле ТАПВ в случае наличия на ВЛ неустранимого несимметричного КЗ попытка отключения неповрежденных фаз может привести к повреждению элегазового выключателя.

Мероприятия по уменьшению влияния апериодической составляющей в токе, протекающем через контакты выключателя. В целях улучшения условий работы элегазовых выключателей ВЛ, имеющими шунтирующими реакторами, предлагаются следующие меры:

1) применение предвключаемых резисторов в каждой фазе (элегазовые выключатели фирм-производителей ABB, AREVA предусматривают установку подобных резисторов);

2) применение устройства синхронизации моментов включения контактов фаз выключателя.

Применение предвключаемых резисторов. Введение дополнительных резисторов последовательно с ВЛ позволяет увеличить отношение $R_{\text{ЭКВ}}/X_{\text{ЭКВ}}$, и соответственно уменьшить амплитуду тока и длительность апериодической составляющей в токе, протекающем через контакты выключателя. Время предвключения резистора находится в пределах 5,5-10,0 мс. При расчетах время предвключения принято равным 8 мс.

При использовании предвключения резисторов за промежуток времени перед замыканием основных контактов выключателя замыкаются вспомогательные контакты, включенные последовательно с активным сопротивлением.

В целях обеспечения эффективности применения рассматриваемой меры:

– определялись оптимальные значения сопротивлений предвключаемых резисторов в каждой фазе выключателя в целях сведения к минимуму (в идеале к нулю) интервала времени от момента замыкания основных контактов до начала регулярного перехода фазного тока через нуль в неповрежденных фазах выключателей ВЛ при различных несимметричных КЗ в начале и конце ЛЭП и в режиме холостого хода;

– оценивались возможные значения перенапряжений в фазах, возникающих при применении предвключаемых резисторов.

В табл. 8 приведены значения предвключаемых резисторов для выключателей различных ВЛ, исключая влияние апериодической составляющей на токи неповрежденных фаз, протекающих через выключатель, при отключении несимметричных КЗ, а также при отключении ЛЭП в режиме холостого хода.

Таблица 8. Значения сопротивлений предвключаемых резисторов, Ом

Наименование ВЛ				
КАЭС – ПС Новобрянская	ПС Новобрянская – САЭС	РоАЭС – ПС Буденновская	ПС Шахты – РоАЭС	ПС Буденновская – ПС Чирюрт
1000	1000	400	1400	400

Анализ фазных напряжений при одностороннем включении ВЛ при их опробовании или при ТАПВ на несимметричное КЗ и при применении предвключаемых в течение 8 мс резисторов в линейных выключателях показал, что в различных точках рассматриваемых ВЛ могут возникать кратковременные коммутационные перенапряжения, превышающие допустимые по условиям изоляции значения.

Применение устройства синхронизации моментов включения контактов фаз выключателя. В случае пофазного управления выключателя

чателем и замыкании контактов фазы выключателя при максимальном значении мгновенного напряжения на этих контактах аperiodическая составляющая в токе выключателя практически не появляется.

Большинство элегазовых выключателей могут быть укомплектованы устройствами пофазного синхронизированного включения (например, устройство RPH2 фирмы AREVA).

Однако при включении вблизи максимума напряжения на контактах выключателя увеличивается уровень коммутационных перенапряжений. Регулярное включение в максимум напряжения может привести к повышению вероятности повреждения оборудования.

Оптимальными моментами коммутации контактов фаз выключателя для элегазовых выключателей ВЛ с точки зрения уменьшения влияния аperiodической составляющей в токе является следующая последовательность:

- замыкание контактов выключателя фазы «А» в момент (оптимальное коммутационное время), соответствующий максимальному значению амплитуды фазного напряжения U_A ;

- замыкание контактов фазы «В» выключателя через 7,3 мс относительно момента замыкания контактов фазы «А»;

- замыкание контактов фазы «С» выключателя через 13,3 мс относительно момента замыкания контактов фазы «А».

Принимается, что при таком управлении моментами включения выключателем обеспечивается замыкание контактов фаз выключателя при максимальном значении мгновенного напряжения на этих контактах.

Анализ результатов исследований применения пофазного управления выключателями с обеспечением замыкания контактов фазы выключателя при максимальном значении мгновенного напряжения на этих контактах показывает хорошие результаты по практическому исключению влияния аperiodической составляющей в токе выключателя во всех возможных режимах (при включении ВЛ на холостой ход, в цикле неуспешного АПВ при всех видах несимметричного КЗ на ЛЭП) при наличии шунтирующих реакторов на ЛЭП без применения предвключаемых резисторов.

Тем не менее, оценка возможных значений перенапряжений в фазах, возникающих при применении пофазного управления выключателем, показывает, что возможны значительные (до двукратных значений) повышения фазных напряжений на реактированных ЛЭП.

Выводы:

1. Наличие шунтирующих реакторов на ВЛ 330-750 кВ создает неблагоприятные условия для надежной работы элегазовых выключателей.

2. Из мер, позволяющих уменьшить влияние аperiodической составляющей тока для улучшения условий работы элегазовых выключателей ВЛ, имеющих шунтирующие реакторы, в режимах их одностороннего включения, могут быть реализованы (как совместно, так и в отдельности):

- применение предвключаемых резисторов в каждой фазе;

– применение устройства синхронизации моментов включения контактов фаз выключателя.

3. При использовании выше указанных мер, необходимо предусматривать мероприятия по ограничению возможных перенапряжений на ВЛ.

4. Отключение шунтирующих реакторов ВЛ не может быть применено в качестве эффективной меры по уменьшению влияния аperiodической составляющей тока.

Литература

1. **Евдокунин, Г.А.** Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели / Г.А. Евдокунин [и др.] // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – №3(51). – С. 64-69.
2. **Справочник** по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Д. Файбисовича. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.
3. **Базавлук, А.А.** Об эксплуатации подстанций и линий электропередачи высокого напряжения, оснащенных шунтирующими реакторами / А.А. Базавлук, К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров // Электро. – 2009. – № 6. – С. 36-40.

УДК 621.311

Н.А. ОГЕРЕЛЫШЕВ, к.т.н., доцент,
А.А. БРАТОЛЮБОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ)

Однофазные замыкания на землю как источник опасного наведенного напряжения на отключенных ВЛ 6 кВ

Однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, в отличие от режима короткого замыкания, вызывают небольшие токи, сопоставимые с токами нормальной нагрузки. Тем не менее, в режимах однофазного замыкания наводимые напряжения в отключенных для ремонта ВЛ могут представлять большую опасность, чем при токах нормальной нагрузки во влияющих ВЛ. При этом, как показывают ниже приводимые результаты расчетов, опасные напряжения наводятся при переходных процессах в момент замыкания и имеют спектр повышенных частот.

В качестве примера рассматривается двухцепная ВЛ 6 кВ протяженностью 5 км, одна из цепей которой отключена для ремонта, а вторая является влияющей с максимальным током исходного режима 300 А и последующим однофазным замыканием на землю. Линия выполнена проводом АС-95. Используются железобетонные опоры с вертикальным расположением проводов с двух сторон от опоры и расстоянием до нее 1,3 м. Расстояние нижнего провода до земли в месте подвеса составляет 9,1 м, а расстояние между фазами одной цепи – 2 м.

Линия питается с шин 6 кВ подстанции и представляется с учетом распределенности параметров. Другие отходящие с этих шин ли-

нии косвенно учтены эквивалентными емкостями на землю. Трансформатор подстанции 110/ 6 кВ имеет мощность 25 МВА.

Моделируется металлическое замыкание на землю фазы С в конце влияющей линии. Действующее значение тока замыкания на землю составляет 14 А. Наведенное напряжение оценивается в отключенной линии, в начале, середине (на месте работы) и в конце.

В зависимости от мест наложения заземлений на отключенной линии, получены результаты по наведенному напряжению в фазе А (рис 1, 2, 3). В фазах В и С характер переходного процесса и величины наведенного напряжения имеют схожий характер.

На рис. 4 представлена частотная характеристика, отражающая величину входного сопротивления в средней точке отключенной линии с учетом распределенности параметров и элементов, примыкающих к ней. Из характеристики следует наличие нескольких резонансных частот, влияющих на спектр частот переходного процесса наведенного напряжения (рис. 1, в).

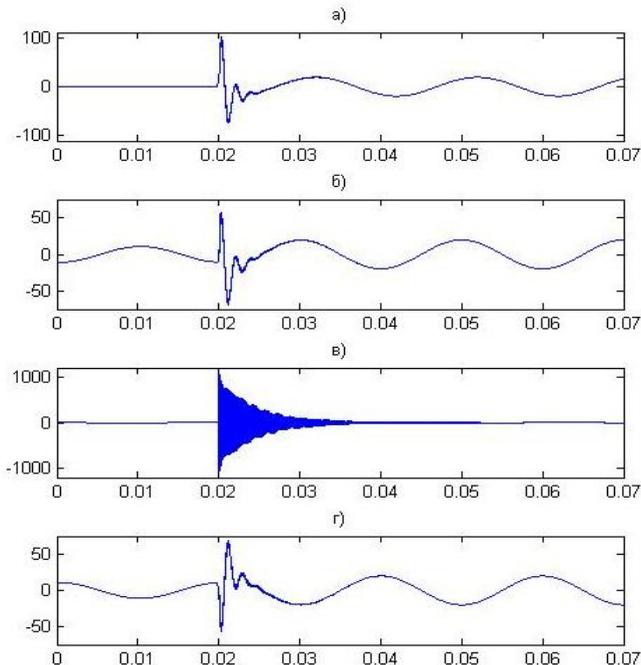


Рис. 1. Временные (в секундах) диаграммы изменения мгновенных значений: а – тока замыкания на землю, (А); б – наведенного напряжения в начале отключенной линии (В); в - наведенного напряжения в середине отключенной линии (В); г - наведенного напряжения в конце отключенной линии (В) при заземлении отключенной линии по её концам с сопротивлением заземления 1 Ом

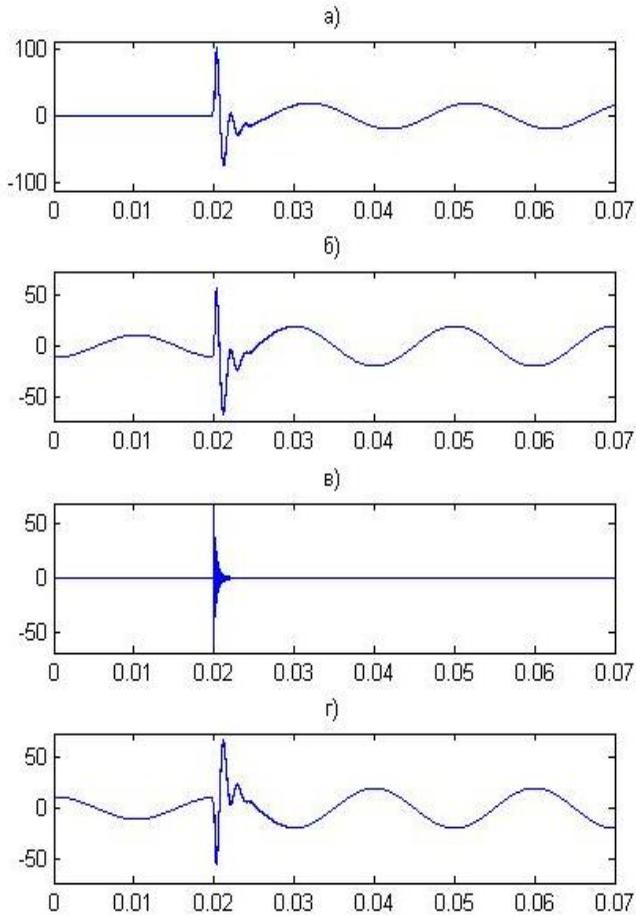


Рис. 2. Временные (в секундах) диаграммы изменения мгновенных значений: а – тока замыкания на землю, (А); б – наведенного напряжения в начале отключенной линии (В); в - наведенного напряжения в середине отключенной линии (В) при заземлении отключенной линии по её концам с сопротивлением заземления 1 Ом и в середине - с сопротивлением 10 Ом

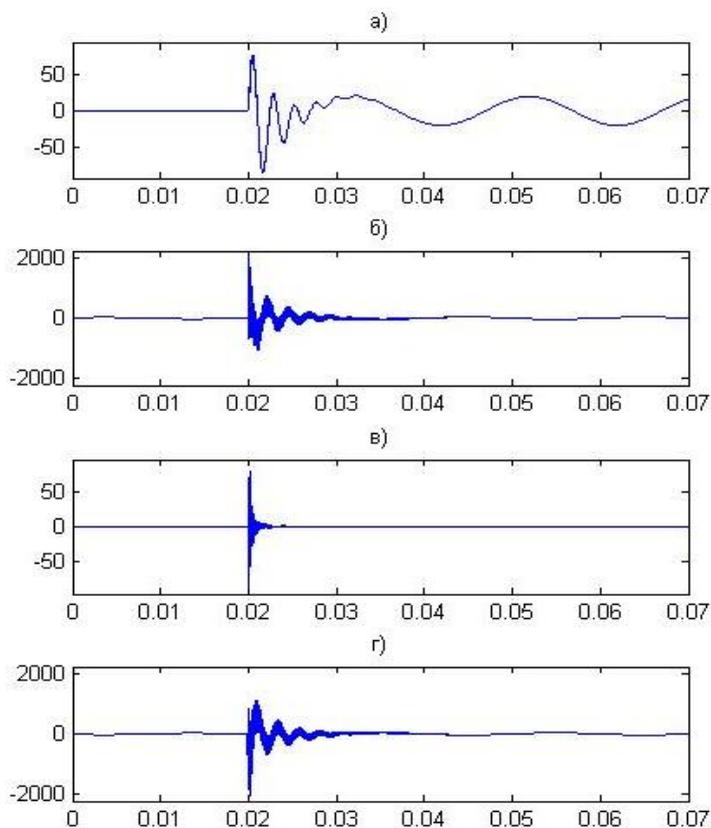


Рис. 3. Временные (в секундах) диаграммы изменения мгновенных значений: а – тока замыкания на землю, (А); б – наведенного напряжения в начале отключенной линии (В); в - наведенного напряжения в середине отключенной линии (В); г - наведенного напряжения в конце отключенной линии (В) **при заземлении отключенной линии только на месте работ, в её середине, с сопротивлением заземления 10 Ом**

Наибольшие наведенные напряжения сведены в табл. 1.

Табл. 1. Наибольшие мгновенные значения наведенного напряжения, В

№ рис.	Исходный установившийся режим			Замыкание на землю в режимах					
				Переходном			установившемся		
	Н	С	К	Н	С	К	Н	С	К
1	11	0	11	67	1100	67	20	0	20
2	11	0	11	65	63	65	20	0	20
3	28	0	28	202 2	89	204 0	38	0	39

Примечание. Начало, середина, конец линии обозначены буквами: Н.С.К

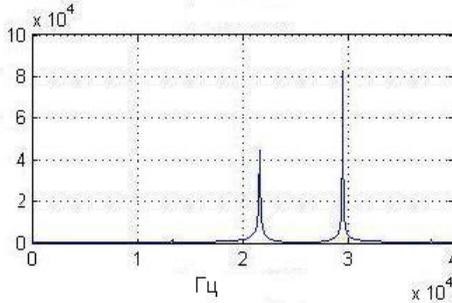


Рис. 4. Частотная характеристика входного сопротивления «фаза-земля» в омах в середине отключенной ВЛ при заземлении её по концам с сопротивлением 1 Ом

Выводы:

1. Исходный установившийся режим не представляет опасности по наведенному напряжению при любом способе заземления отключенной линии, т.к. амплитуда наведенного напряжения не превышает 28 В, а действующее значение – 20 В (при норме 25 В).
2. Наведенное напряжение в середине отключенной линии, на месте работ, при любом способе её заземления, так же не представляет опасности.
3. Опасность наведенного напряжения может возникать в переходных режимах замыканий на землю, при этом для средней точки отключенной линии, на месте производства работ, предпочтительным является заземление линии в трех местах: по концам и в её середине.
4. Для оценки допустимости импульса напряжения с амплитудой 63 В (рис. 2) необходим его спектральный анализ и учет длительности воздействия.

Устойчивость электроэнергетических систем с регулируемой продольной компенсацией

Продольная компенсация индуктивного сопротивления линий электропередачи является действенным средством повышения пропускной способности линий. Последнее стало весьма актуальной задачей в последнее время в связи с ростом нагрузок в промышленной и коммунальной сферах. Если степень компенсации линии регулируется, то такая сеть приобретает свойства так называемой активно-адаптивной или гибкой сети. В зарубежной практике они носят название FACTS [1]. Было рассмотрено влияние регулируемого устройства продольной емкостной компенсации (УПК) на устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС), содержащей подобные элементы, на примере ЭЭС, изображенной на рис. 1.

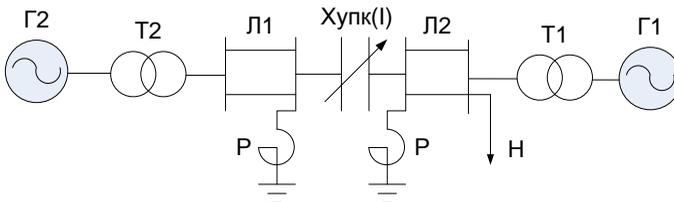


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

Регулирование осуществлялось путем изменения сопротивления емкости в зависимости от тока через УПК (передаваемой по линии мощности), которое выражается формулой (1), предложенной в [2]:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 \cdot I)^2} \quad (1)$$

где $X_{\text{УПК}}(I)$ – сопротивление емкости в УПК; I – ток линии; K_1, K_2 – коэффициенты регулирования УПК.

Угловые характеристики $P_1(\delta_{21})$ и $P_2(\delta_{21})$, представленные в [3], показали увеличение предельного по статической устойчивости взаимного угла δ_{21} в зависимости от закона регулирования сопротивления $X_{\text{УПК}}(I)$, а также увеличение предела передаваемой мощности по сравнению с нерегулируемым сопротивлением.

Анализ кривых изменения взаимного угла между векторами ЭДС генераторов в переходном режиме показал существенное влияние на переходный процесс наличия в УПК управляемой емкости, при которой величина сопротивления $X_{\text{УПК}}(I)$ зависит от тока линии, а, следова-

тельно, от передаваемой мощности. С ростом передаваемой мощности растет ток линии, а, следовательно, и степень компенсации, что приводит к увеличению тормозящего момента, вследствие чего колебания взаимного угла затухают раньше, имеют меньшую амплитуду, переход к новому установившемуся режиму, который наблюдается при меньшем значении угла, происходит быстрее. В данном случае очевидно, что применение управляемой емкости в УПК увеличивает предел передаваемой мощности по условию сохранения динамической устойчивости.

С увеличением коэффициента K_2 характеристики $X_{УПК}(I)$ смена знака свободного члена характеристического уравнения происходит при больших значениях взаимного угла δ_{21} , что говорит о положительном влиянии регулируемого УПК на апериодическую статическую устойчивость системы.

Таким образом, применение регулируемой продольной емкостной компенсации дальних электропередач повышает предел передаваемой мощности по условию сохранения апериодической статической устойчивости, а также положительно влияет на переходные режимы при больших возмущающих воздействиях. Однако подобное регулирование увеличивает возможность возникновения самовозбуждения и самораскачивания в системах, содержащих такие элементы. Эти явления могут возникать совместно при увеличении степени компенсации [4].

При приближении сопротивления емкости в УПК к границе зоны самовозбуждения и самораскачивания начинается колебательный процесс с нарастающей амплитудой, который можно наблюдать на рис. 2.

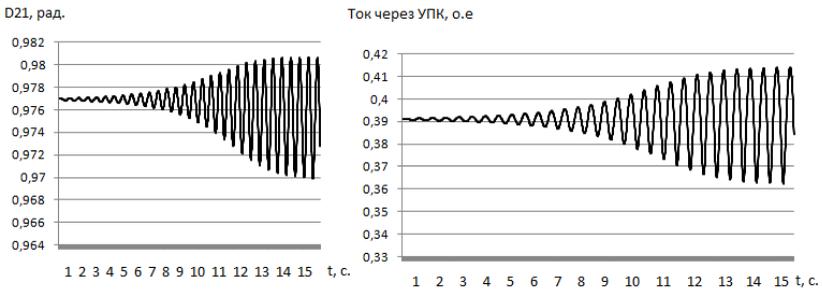


Рис. 2. Кривые изменения взаимного угла между векторами ЭДС двухмашинной системы и тока через УПК по времени

Анализ предельных режимов показал, что такое отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость наблюдается при высоких значениях степени компенсации. Такая степень компенсации не применяется в практике эксплуатации электрических систем.

Автоматическое регулирование возбуждения сильного действия генераторов позволяет устранить колебания режимных параметров и значительно увеличить степень компенсации индуктивного сопротивления линии электропередачи. На рис. 3 показаны графики переходного процесса с той же степенью компенсации, что и на рис. 2, но с применением АРВ сильного действия генераторов. Регулирование осуществлялось по отклонению напряжения на шинах генератора, по первой и второй производным угла.

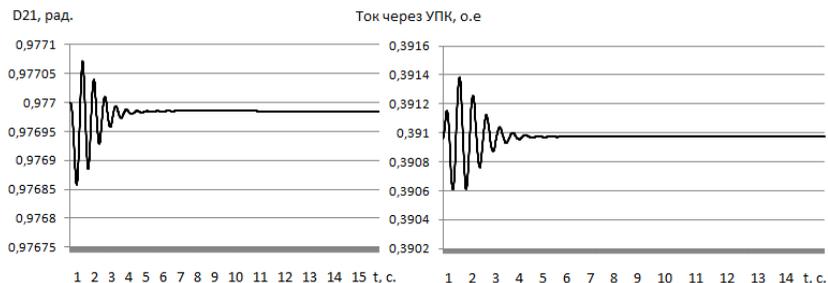


Рис. 3. Кривые изменения взаимного угла между векторами ЭДС двухмашинной системы и тока через УПК по времени с учетом АРВ СД

Как показали исследования, даже при таких высоких степенях компенсации при совместном выборе законов регулирования управляемого УПК и АРВ можно устранить отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость.

Литература

1. **Электрические** сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы. В 3 т. / под общей редакцией чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.
2. **Голов В.П.** Применение регулируемой компенсации линии электропередачи // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – №6. – С. 3-8.
3. **Голов В.П.** Устойчивость электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // Вестн. ИГЭУ. – 2012. – № 5. – С. 26-31.
4. **Веников В.А.** Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах / В.А. Веников, Н.Д. Анисимова, А.И. Долгинов – М.: Высшая школа, 1964.

УДК 621.311.014

Т.Е. ПУТОВА, руководитель группы
П.Г. МАЛЮШИЦКИЙ, ведущий инженер,
М.В. ВЬЮНОВ, заместитель главного инженера
(ООО УПЦ "Волжскэнергонадзор")
В.П. ГРЕЧИН, к.т.н. член МЭА,
г. Нижний Новгород

Автоматическая система компенсации емкостного тока однофазного замыкания

Работа электрических сетей (ЭС) в аварийных режимах поддерживается, в том числе, путем ограничения тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Для этой цели используются регулируемые дугогасящие реакторы (ДГР). ДГР различаются способом регулирования индуктивности, которая постоянно должна поддерживаться на значении, резонирующем с изменяющейся емкостью ЭС. Эта задача выполняется автоматическими регуляторами (АР). Работа регуляторов, выполненных на амплитудно-фазовом принципе (АФП), в условиях ОЗЗ, как правило, не предусмотрена.

Для работы АР, выполненных на основе АФП, используется напряжение нейтрали (НН), вызываемое асимметрией фазных проводимостей ЭС, которое должно быть определенной величины. Поведение вектора НН, его направление и модуль, при емкостной и активной асимметрии различно.

Поэтому, в момент возникновения ОЗЗ, АР должен быть заблокирован. Для эффективной работы блокировки необходимо ее правильно настроить путем выбора уставки срабатывания по НН. Рассмотрим поведение НН при активной и емкостной асимметрии, т.е. при наличии ОЗЗ и при его отсутствии.

Известно, что в любой электрической цепи на угловые характеристики между напряжениями, между токами, между токами и напряжениями оказывают влияние соотношения активных и реактивных сопротивлений.

Напряжение на нейтрали при емкостной асимметрии.

При отсутствии ОЗЗ преобладает емкостная асимметрия (естественная или искусственная). Даже незначительное отклонение параметров ЭС влияет на емкостную асимметрию и изменяет фазовые характеристики контура нулевой последовательности:

- угол вектора НН отличается от угла вектора напряжения фазы, где возникла асимметрия, и занимает промежуточные значения от 0° до 90° . Знак и величина угла будут определяться соотношением между емкостной и индуктивной проводимостью;
- при настройке ЭС в «резонанс» угол вектора НН расположен под 90° по отношению к углу вектора напряжения фазы с измененной емкостью (где возникла асимметрия). На этот угол и настраивается АР.

Напряжение на нейтрали при активной асимметрии.

В случае появления ОЗЗ возникает активная асимметрия, которая подавляет ёмкостную. В этом случае, как правило, вектор НН меняется без изменения ёмкости сети. При этом угол активной составляющей вектора НН может не совпадать с углом реактивной составляющей и может быть любым, так как зависит от следующих параметров:

- на какой фазе возник дефект;
- степени расстройки компенсации;
- величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

При отсутствии блокировки это спровоцирует и расстройку компенсации, и рост тока в месте ОЗЗ. Особенно опасным является режим недокомпенсации. При изменении активной проводимости фазы на некоторую величину, изменяются и фазовые характеристики контура нулевой последовательности сети. При этом происходит следующее:

- при металлическом ОЗЗ сопротивление в точке повреждения равно нулю, так как место повреждения шунтирует (закорачивает) сопротивление изоляции фазы относительно земли. Вследствие этого НН становится равным фазному значению. Направление вектора НН составляет 180° по отношению к вектору фазного напряжения до повреждения. То есть напряжение на повреждённой фазе относительно земли равно нулю и НН от величины расстройки не зависит;

- при начальном развитии дефекта, когда изменение сопротивления фазы относительно земли ещё незначительно, проводимость фаз относительно земли определяется, прежде всего, ёмкостной составляющей. Угол вектора НН, вызванного развивающимся дефектом по отношению к фазе, на которой этот дефект возник, будет близким к 90° . При этом величина НН будет незначительной и сопоставима с естественной или искусственной несимметрией до повреждения;

- при неполной земле вектор НН по углу и величине будет занимать промежуточные значения, так как активное сопротивление относительно земли повреждённой фазы будет определяться, прежде всего, активным сопротивлением в точке повреждения. При этом ёмкостное сопротивление этой же фазы относительно земли останется неизменным. Соотношение активного сопротивления и ёмкостного будет иным, чем на других фазах.

При этом блокировка «срабатывания регулятора при ОЗЗ», предусмотренная в АР, должна удовлетворять требованиям ПТЭ – не превышать $0,15U_{\phi}$.

Оценим качественно, какой должна быть уставка «напряжения срабатывания блокировки при ОЗЗ» не нарушая соответствующих Директивных документов. Для выполнения этого условия необходимо:

- в режиме регулирования – должна быть выше значения НН;
- при однофазном замыкании – должна быть ниже значения НН.

Вышеуказанные требования являются взаимоисключающими, что требует принятия компромиссного решения.

Таким решением является выбор уставки «напряжения срабатывания блокировки при ОЗЗ» АР, которая должна быть отлажена не только при металлической земле, когда НН близко к фазному напряжению, но и при начальном и развивающемся дефектах фазной изоляции, так как:

- в случае неполного или развивающегося ОЗЗ поведение НН носит непредсказуемый характер, является хаотичным, зависящим от характера протекаемых процессов в изоляции дефектной фазы;

- при дуговых замыканиях возможны значения НН как меньше, так и больше фазного напряжения. В этом случае в напряжении присутствуют кроме основной гармоники высокочастотные составляющие. При этом и основная, и высшие гармоники имеют нестационарный характер. Учитывая высокую чувствительность цифровых микросхем к высокочастотным воздействиям и наводкам, нестационарность входного сигнала по амплитуде, фазе и частоте предсказать реакцию АР в этих условиях невозможно. Выбор уставки "напряжения срабатывания блокировки при ОЗЗ" позволит:

- предупредить превышение НН в процессе регулирования;
- при однофазных повреждениях (металлическое замыкание на землю, замыкание через переходное сопротивление, дуговые замыкания с открыто горящей дугой и с горением дуги в замкнутом объеме) охватить почти весь диапазон возможных значений НН.
- учесть различные виды однофазных повреждений, сопровождаемых появлением НН, когда регулирование реактора нежелательно (неполнофазные режимы, феррорезонансные и резонансные процессы).

Выводы

1. Эффективная работа автоматической блокировки определяется ее правильной настройкой путем выбора уставки срабатывания по напряжению нейтрали.

2. Автоматическая блокировка должна действовать не только при металлической земле, но и при развивающемся повреждении фазной изоляции.

СЕКЦИЯ «НАДЕЖНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СТАНЦИЙ И ЭНЕРГОСИСТЕМ»

УДК 621.311

Д.А.АНДРЕЕВ, к.т.н., докторант, гл. технолог
(ИГЭУ, ОАО «Зарубежэнергопроект»), г. Иваново
А.Н. НАЗАРЫЧЕВ, д.т.н., профессор
(ПЭИПК), г. Санкт-Петербург

Понятие жизненного цикла электроустановки и ее технического состояния с позиции системной инженерии

Системная инженерия представляет собой междисциплинарный подход и средства для создания успешных технических систем и объектов [1].

Электроустановка (ЭУ) является сложным техническим объектом (системой) и представляет собой совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другие виды энергии [2]. В процессе эксплуатации ЭУ подвергается физическому и моральному износу и перестает надлежащим образом выполнять возложенные на него функции или отвечать возросшим к нему требованиям. Это является причиной вывода его из эксплуатации, ликвидации и дальнейшей утилизации отходов.

Совокупность взаимосвязанных процессов изменения состояния ЭУ при ее создании, использовании (эксплуатации) и ликвидации с избавлением от отходов путем их утилизации и/или удаления представляет собой жизненный цикл (ЖЦ) объекта. За начало ЖЦ принимают зарождение идеи о необходимости создания ЭУ, которое обусловлено потребностями современного рынка, выявленными в результате, например, маркетинговых исследований и определения конъюнктуры рынка, а за конец – ее ликвидацию с последующей утилизацией отходов.

Для ЭУ, как технического объекта, под состоянием целесообразно подразумевать техническое состояние (ТС), т.е. совокупность параметров, характеризующих изменение свойств ЭУ или ее частей в процессе эксплуатации, установленных нормативно-технической документацией [4]. ЖЦ включает в себя не только эксплуатацию, в рамках которой происходит ухудшение или улучшение (за счет восстановления) ТС, но и сам процесс создания и ликвидации объекта. В процессе создания ТС объекта постоянно «улучшают» или сохраняют для того, чтобы к моменту ввода в эксплуатацию он имел надлежащее ТС, при-

сущее новой ЭУ (в соответствии с нормативно-технической документацией). После эксплуатации объекта, когда ТС или потребительские свойства не позволяют продолжать эксплуатацию его ТС «обнуляют» путем ликвидации. Принимая это во внимание, под ТС следует понимать совокупность параметров, характеризующих изменение свойств ЭУ или ее частей в процессе ЖЦ, установленных нормативно-технической документацией.

Понятие ЖЦ обычно рассматривают как основу деятельности по разработке нестандартного или нового оборудования. Любой процесс разработки и внедрения в использование (в том числе серийное) разбивается на стадии, которые ассоциируются с определенными видами работ или функций, выполняемых разработчиками в тот или иной момент развития. Стадии характеризуются направленностью выполняемых функций на достижение локальных (для конкретной стадии) целей.

Для решения поставленных задач в рамках стадий ЖЦ выполняют определенные процессы. Процесс ЖЦ – это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы [3], т.е. изменяющих состояние объекта. Вследствие действий, управляемых и исполняемых людьми в одной или нескольких организациях, выполняющих процессы, выбранные для данной стадии ЖЦ, происходит продвижение системы по ее циклу. По сути, процессы описывают то, как выполнять работу, продвигающую систему по ЖЦ. Стандарт ISO/IEC 15288:2002 «Системная инженерия – Процессы жизненного цикла системы» [3] предлагает общий набор процессов, охватывающий весь ЖЦ объектов, и предписывает при работе со сложным объектом, в том числе ЭУ, иметь описание ее ЖЦ. Решения, касающиеся выбора процессов, должны приниматься по критериям эффективности затрат и ресурсосбережения, а также минимизации рисков.

Каждый из процессов ЖЦ, реализуемый тем или иным методом, может при необходимости применяться в любой точке ЖЦ, и в их применении нет предопределенного порядка или последовательности. Конкретное назначение и время применения этих процессов на протяжении ЖЦ зависит от множества факторов, включая коммерческие, организационные, технические и др. ЖЦ конкретного объекта, таким образом, представляет собой сложную систему процессов, обычно обладающих характеристиками параллельности, итеративности, рекурсивности и зависимости от времени или наработки.

Описание ЖЦ документирует решения принятые в процессе конкретизации на каждой стадии. Принятые решения, как правило, касаются выделения ресурсов, распределения ролей исполнителей, выбора инструментов, общего руководства, контроля и т.п.

Стандарт [3] вне зависимости от особенностей объекта, его назначения и области применения предлагает рассматривать шесть стадий ЖЦ: стадия замысла; стадия разработки; стадия производства; стадия применения; стадия поддержки применения; стадия прекращения

ния применения и списания. Для ЭУ стадии ЖЦ укрупнено можно представить следующим образом:

1. Маркетинговые исследования потребностей рынка;
2. Техничко-экономическое обоснование;
3. Опытно-конструкторская и проектная работа (включая научно-исследовательскую составляющую при необходимости);
4. Подготовка производства;
5. Производство/строительство;
6. Техническая эксплуатация (включая техническое обслуживание и ремонт);
7. Ликвидация и утилизация.

Рассмотрение всех стадий ЖЦ существенно усложняет задачу проектирования и производства оборудования, однако, позволяет оптимизировать издержки за счет учета наиболее вероятного «поведения» объекта на каждой из рассматриваемых стадий. В настоящее время бурного развития информационнх технологий помощь в этом оказывает организационно-техническая система, обеспечивающая управление всей информацией об объекте и связанных с ним процессах на протяжении всего его ЖЦ, начиная с проектирования и производства до снятия с эксплуатации. Данная система реализует технологию управления ЖЦ объекта – PLM (Product Lifecycle Management).

Учет стадий ЖЦ и ТС позволяет уменьшить издержки на доработку объекта или предотвратить возможную аварию вследствие действия «непредусмотренных» обстоятельств, рационально спланировать деятельность по созданию, эксплуатации, обслуживанию и ремонту ЭУ.

Литература

1. **Systems Engineering Handbook**, version 2a. – INCOSE, 2004.
2. **Правила** устройства электроустановок, Изд. 7.
3. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005**. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
4. **ГОСТ 20911-89**. Техническая диагностика. Термины и определения.

УДК 621.318

А.В. РАССКАЗЧИКОВ, к.т.н., доцент,
О.Н. КАЛАЧЕВА, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Анализ надёжности 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 при-

менять 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.

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.

Для анализа надёжности вариантов схем выдачи мощности ТЭЦ по рис. 1 и рис. 2 разработаны деревья отказов (рис. 3, 4, 5, 6).

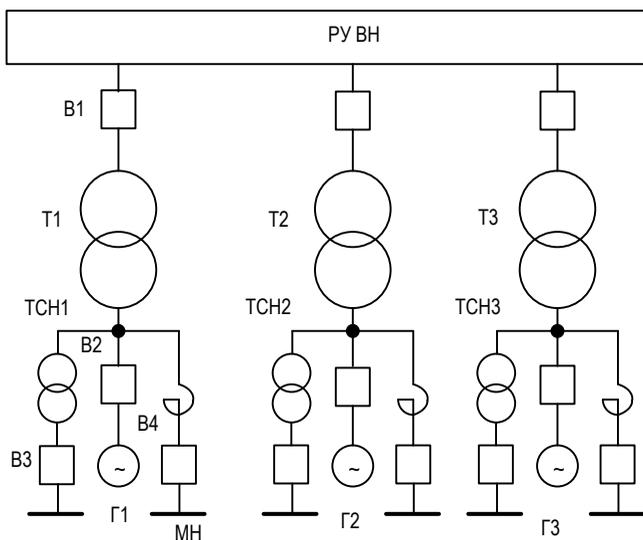


Рис. 1. Блочная схема выдачи мощности

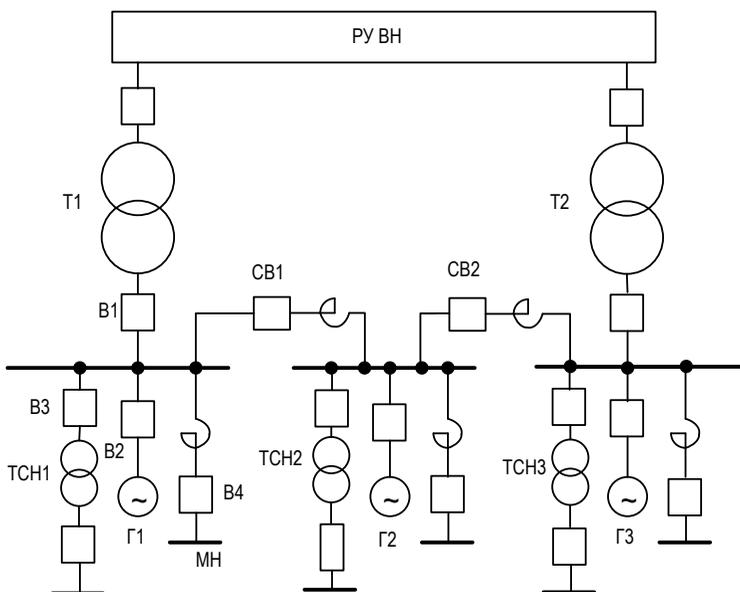


Рис. 2. Схема выдачи мощности с ГРУ

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.

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.

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.

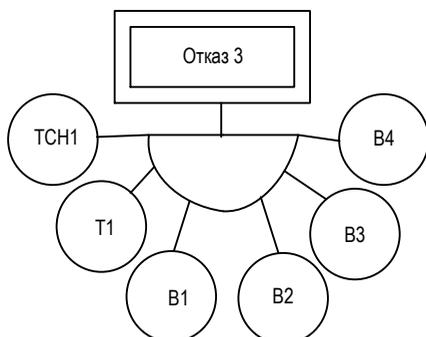


Рис. 3. Дерево отказа 3 для блочного варианта

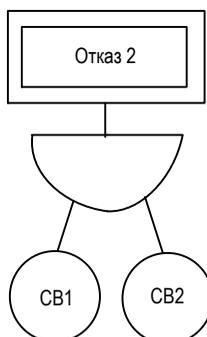


Рис. 4. Дерево отказа 2 для варианта с ГРУ

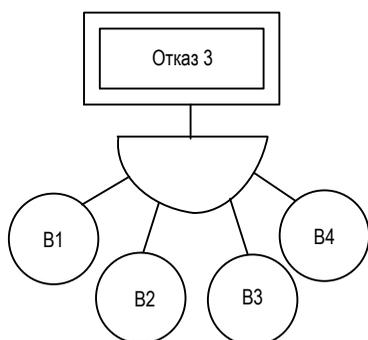


Рис. 5. Дерево отказа 3 для варианта с ГРУ

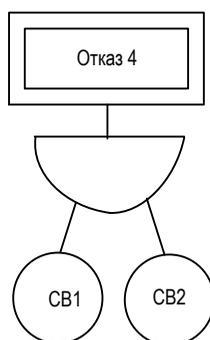


Рис. 6. Дерево отказа 4 для варианта с ГРУ

Необходимо отметить, что ТЭЦ не участвуют в регулировании частоты в энергосистеме. При отклонениях частоты делительная автоматика отключает вводные выключатели ГРУ В1 и генераторы работают только на местную нагрузку. Это очень важно, если потребители чувствительны к частоте. Такой режим можно обеспечить и в блочном варианте путём установки двух генераторных выключателей на блоке или путём отключения блока от системы выключателем В1.

О.Н. КАЛАЧЕВА, к.т.н., доцент;
 А.В. РАССКАЗЧИКОВ, к.т.н., доцент;
 А.С. СТРАХОВ, студент
 (ИГЭУ), г. Иваново

Оценка достоверности компьютерной модели для изучения режимов заземления нейтрали

Согласно [1], предлагалось для изучения студентами способов заземления нейтралей использовать компьютерную модель, представленную на рис. 1, реализованную в программе схемотехнического моделирования Electronics Workbench.

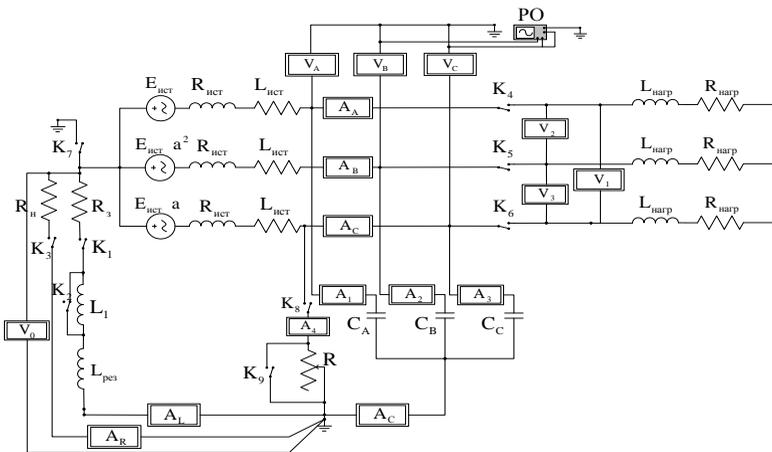


Рис. 1. Схема компьютерной модели

Данная модель принята упрощенной. Были приняты следующие допущения:

- несколько линий, подключённых к секции шин НН, моделируются одной линией эквивалентных параметров;
- нагрузка совместно с линиями до нагрузки моделируется с помощью введённых в модель $L_{нагр}$ и $R_{нагр}$, так как характер нагрузки и сопротивления линий обычно активно-индуктивный;
- схема соединения обмоток силового трансформатора подстанции, являющегося источником для данной сети – “звезда-треугольник”, в модели трехфазный источник моделируется своими фазными ЭДС и внутренними сопротивлениями, которые от схемы соединения не зависят;

– кабельные линии от источника (силового трансформатора) до нагрузки представлены эквивалентной линией с сосредоточенными параметрами, причём поперечные ёмкости всех трёх фаз линии C_A , C_B , C_C равны. Вследствие этого данная модель подходит только для исследования установившихся режимов. Для исследования переходных процессов и возникающих при этом перенапряжений необходимо моделировать линию с распределёнными параметрами;

– с целью упрощения схемы модели осуществлён перенос точки подключения дугогасящего реактора с нейтрали, искусственно созданной на трансформаторе заземления нейтрали (ТЗН), в точку нейтрали сети на источнике, так как потенциалы этих точек по отношению к земле во всех режимах сети – одинаковы, и пути протекания токов при однофазном замыкании на землю проходят через те же элементы, если учесть, что сопротивления источника и ТЗН – пренебрежимо малы.

Эксперимент на модели, проведённый для режима изолированной нейтрали, подтверждает её корректность в отношении исследования тех режимов, которые изучаются в лабораторной работе. Исследовалась сеть реальной подстанции со следующими характеристиками:

Таблица 1. **Вариант сети НН подстанции**

Напряжение сети $U_{НН}$, кВ	Тип источника (трансформатора)	Коэффициент загрузки трансформатора, k_3	Сечение кабельной линии, $мм^2$	Количество линий, отходящих от одной шины НН, N	Длина отходящих линий, L, км
10	ТДН-16000/110	0,6	70	8	0,3

На модели исследовались режимы: 1Р – нормальный режим; 2Р – замыкание на землю фазы С (металлическое и через переходное сопротивление).

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Исследование режимов сети с изолированной нейтралью**

Режим	U_n , кВ	$I_{Сзам}$, А	R, Ом	I_{CA} , А	I_{CB} , А	I_{CC} , А	$U_{фA}$, кВ	$U_{фB}$, кВ	$U_{фC}$, кВ	U_{AB} , кВ	U_{BC} , кВ	U_{CA} , кВ
1Р	0	-	-	1.9	1.9	1.9	5.77	5.77	5.77	9.99	10	10
	5.78	5.69	0	3.28	3.28	0.18	10	10	0	10	10	10
2Р	5.66	5.58	200	3.05	3.42	0.37	9.3	10.4	1.12	9.99	10	10
	5.53	5.45	300	2.92	3.45	0.54	8.88	10.5	1.64	10	10	9.99
	5.17	5.1	500	2.63	3.44	0.84	8	10.4	2.55	10	9.99	10
	4.1	4.04	1000	2.03	3.22	1.33	6.19	9.79	4.04	10	9.99	9.99

В ходе исследований на модели было выявлено:

▪ В нормальном режиме с изолированной нейтралью ёмкостные токи каждой фазы на землю равны друг другу, напряжение каждой фазы равно 5.77 кВ, а напряжения между фазами – 10 кВ;

▪ В режиме металлического замыкания на землю на нейтрали появляется напряжение смещения нейтрали $U_n=5,78$ кВ, что равно фазному напряжению. Напряжения неповреждённых фаз увеличиваются до значения 10 кВ, то есть до величины линейного напряжения. Кроме того, увеличивается ёмкостный ток неповреждённых фаз. Линейные напряжения при замыкании на землю не изменяются.

▪ В режиме замыкания на землю через переходное сопротивление наблюдается характерная зависимость величины фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали от величины переходного сопротивления R (табл. 2, рис. 2).

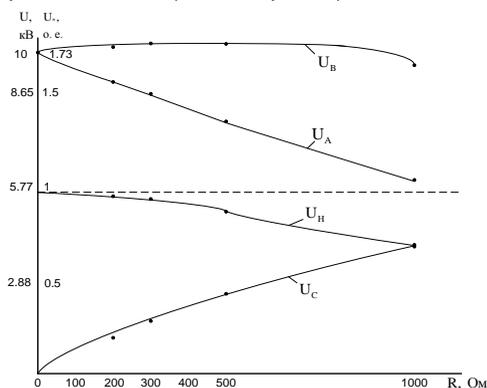


Рис. 2. Зависимости изменения напряжений от переходного сопротивления R в месте замыкания

Характер кривых аналогичен подобным зависимостям, полученным по расчётным формулам для режима замыкания на землю через переходное сопротивление, приведённом в [2] на рис. 29-4.

Результаты эксперимента на модели подтверждают её корректность для исследуемых режимов и возможность её использования для наглядного изучения студентами режимов нейтралей электрических сетей.

Литература

1. **Калачева О.Н.** Исследование режимов нейтрали электрических сетей на компьютерной модели: мат-лы XVI междунар. науч.-техн. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (Бенардосовские чтения). Т.1. – Иваново, 2011. – С. 180–183.
2. **Электрическая** часть станций и подстанций: учеб. для вузов / А. А. Васильев [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990.–640 с.

Об использовании УРОВ в цепях 6 кВ собственных нужд электростанций

Надежность работы системы собственных электрических станций во многом обеспечивает безотказную работу электростанции в целом. Прежде всего, повышенные требования предъявляются к кабельной сети в системе электроснабжения агрегатов собственных нужд. Традиционные компоновочные решения основных и вспомогательных агрегатов электрических станций, распределительных устройств собственных нужд привели к тому, что кабельные линии практически по всей своей длине находятся в пределах основных производственных помещений (главного корпуса).

В этой связи аварийные ситуации в кабельной сети, связанные с невыполнением нормированных условий термической стойкости и невозгораемости кабелей, могут привести к колоссальному материальному ущербу и реальной опасности для здоровья и жизни обслуживающего персонала.

В любом случае выделение тепла от протекающих по жилам кабеля токов происходит одновременно с передачей тепла в окружающую среду.

Основным базовым допущением, широко используемым и значительно упрощающим расчеты по определению термического состояния кабелей, является предположение, что за период КЗ (кратковременный аварийный режим, отключаемый устройствами релейной защиты) тепло, выделяемое токами КЗ в проводнике, целиком идет на нагрев проводника кабеля и не передается в окружающую среду.

В соответствии с [1] при расчетном времени отключения короткого замыкания менее 1 секунды процесс нагрева проводником можно считать адиабатическим, то есть без учета отдачи тепла в окружающую среду.

Критерием термической стойкости и невозгораемости кабельных линий в системе собственных нужд является нормированное значение температуры жилы кабеля в момент отключения короткого замыкания:

$$\theta_K \leq \theta_{K_{доп}}, \quad (1)$$

где $\theta_{\text{дл}}^{\text{ж}}$ – предельно допустимая температура жилы кабеля в режиме КЗ.

Для кабелей, используемых в системе собственных нужд, предельно допустимые температуры в режиме КЗ имеют следующие значения:

200-250⁰С - по условиям термической стойкости;

310-400⁰С – по условиям невозгораемости, в зависимости от типа кабеля и используемой изоляции.

Следует обратить внимание на тот факт, что между предельными температурами, определяющими термическую стойкость и невозгораемость кабелей, разница не столь и велика.

Исходя из принятого критерия термической стойкости и условий невозгораемости кабельных линий в [1] представлено исходное уравнение для определения температуры жил кабеля в момент отключения короткого замыкания:

$$A_K - A_H = \frac{B_K}{q^2}; \quad (2)$$

Очевидно, что решающим элементом в цепи расчетов термического состояния кабельных линий является определение интеграла Джоуля (B_K).

Принципиальное отличие в расчетах термического состояния кабелей при определении термической стойкости и невозгораемости состоит в том, что в первом случае интеграл Джоуля определяется при условии отключения КЗ основной релейной защитой присоединения, а во втором случае – резервной.

В соответствии с [2], на основании практического опыта, при времени отключения короткого замыкания, превышающем 0,4 секунды, следует принимать в расчет резервную релейную защиту и определять условия невозгораемости кабельных линий.

Спецификой схем электроснабжения агрегатов собственных нужд является то, что на одной секции сосредоточены (включены параллельно) электродвигатели, значительно отличающиеся по мощности (от 200 кВт до 8000 кВт). Обязательный учет подпитки места короткого замыкания группой двигателей, подключенных к той же секции, что и поврежденное присоединение, приводит к значительному увеличению сечения кабелей (прежде всего, у маломощных двигателей) по сравнению с длительным режимом работы для обеспечения термической стойкости.

Следует учитывать, что при невыполнении условий, обеспечивающих невозгораемость кабелей при действии резервной защиты, определяющим минимальное сечение кабелей будет именно этот режим.

Наиболее трудные условия возникают при повреждении в конце питающей двигатель кабельной линии или в коробке вводов двигателя и отказе основной быстродействующей защиты или выключателя поврежденной цепи.

В такой ситуации происходит отключение выключателя в цепи ввода секции 6 кВ. При любой организации защиты ввода ее работа оценивается двумя зонами повреждения: основная зона (повреждение на секции) и зона резервного действия (замыкание в конце самого протяженного кабеля).

Действие защит ввода по указанным причинам сопровождается блокировкой действия АВР секции, то есть приводит к потере всех присоединений.

Даже современные защиты вводов при повреждении в конце длинной кабельной линии имеют проблемы с чувствительностью, что приводит в конце концов к увеличению времени отключения. Следует отметить, что отключение ввода секции 6 кВ устраняет только протекающие токи КЗ «от системы», но токи подпитки от параллельно включенных двигателей продолжают поступать в место повреждения.

Определение интеграла Джоуля от совместного действия тока КЗ «системы» и токов подпитки в соответствии с [1] определяется по весьма сложному выражению:

$$B_K = (I_{п,о_с}^2 + 2I_{п,о_с} \cdot I_{п,о_д} \cdot Q_d + I_{п,о_д}^2 \cdot B_d) t_{откл} + I_{п,о_с}^2 \cdot Ta_{э_кв} + I_{п,о_д}^2 \cdot Ta_d + \frac{4I_{п,о_с} \cdot I_{п,о_д} \cdot Ta_{э_кв} \cdot Ta_d}{Ta_{э_кв} + Ta_d}, \quad (3)$$

требующему использования специальных расчетных кривых.

В то же время широко используется аналитическое выражение, которое дает весьма близкие результаты:

$$B_K = I_{п,о_с}^2 (t_{откл} + Ta_{сх}) + 2 \cdot I_{п,о_с} \cdot I_{п,о_д} (T_{п_д} + Ta_{сх}) + I_{п,о_д}^2 \cdot (0,5 \cdot T_{п_д} + Ta_{сх}) \quad (4)$$

Структура выражения (4), так же, как и выражения (3), построена таким образом, что дополнительное действие токов подпитки учитывается на протяжении всего процесса КЗ.

Ориентировочные расчеты, проведенные для секции собственных нужд 6 кВ пылеугольного блока 300 МВт по формуле (4), показывают, что учет токов подпитки вносит в суммарный тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) 24-25%, что существенно влияет на термическое состояние кабеля. Время отключения КЗ, принятое в расчетах $t_{откл}=0,6$ с.

В этой связи возникает предположение о целесообразности введения УРОВ в системе собственных нужд 6 кВ, направленное на одновременное отключение выключателя ввода секции и выключателей всех двигателей, подключенных к рассматриваемой секции, при отказе защиты или выключателя поврежденного присоединения.

Кстати, на электростанциях для уменьшения повреждений в цепях 0,4 кВ при отказе выключателя трансформатора 6/0,4 кВ обычно используется УРОВ, производящее отключение питающих вводов секции 6 кВ.

Рационально организованное УРОВ может сократить время протекания полного тока КЗ, и, уж точно, уменьшить время протекания суммарного тока подпитки.

Для подтверждения предположений о целесообразности введения УРОВ в системе собственных нужд 6 кВ необходимы дополнительные исследования, связанные с учетом дополнительных уточняющих факторов:

- проблемы теплового спада тока КЗ при коротком замыкании в конце длинной кабельной линии;
- учета влияния параметров питающего кабеля на ток подпитки от каждого из двигателей группы (секции).

Литература

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

УДК 621.311

А.Н. НАЗАРЫЧЕВ, д.т.н., профессор,
А.И. ТАДЖИБАЕВ, д.т.н., профессор,
(ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»), г. Санкт-Петербург,
Д.А. АНДРЕЕВ, к.т.н.,
(ОАО «Зарубежэнергопроект»), г. Иваново

Задачи совершенствования теории управления техническим состоянием электрооборудования

Определяющее влияние на степень износа электрооборудования (ЭО) оказывают эксплуатационные факторы, которые действуют в различных условиях и режимах работы. Они приводят к развитию и накоплению дефектов, и к более раннему наступлению предельного состояния и отказу ЭО. Для обеспечения безопасной и эффективной работы, при управлении режимами эксплуатации и ремонта необходимо знать фактический уровень надежности ЭО с учетом воздействия реальных эксплуатационных факторов. Воздействуя на режимы и условия работы, применяя при этом современные методы оценки технического состояния (ТС) оборудования, можно эффективно и безопасно управлять процессом эксплуатации электроустановок [1].

Анализ существующих и активно развивающихся методов и средств технической диагностики ЭО показал [2], что их современный уровень и перспективы развития открывают реальные возможности перехода к новой технологии эксплуатации и ремонта по ТС. Комплексная разработка методов и средств технической диагностики ЭО позволит решить важную отраслевую проблему управления техническим состоянием производственных активов объектов энергетики в условиях перехода отрасли на технологическую платформу Smart Grid [3, 4]. Система мероприятий по совершенствованию теории управления тех-

ническим состоянием ЭО объектов энергетики на основе внедрения методов и средств технической диагностики должна включать неотложные, среднесрочные и перспективные задачи.

Неотложные задачи:

- оценка ТС основного и вспомогательного ЭО, систем защиты, связи, телемеханики, автоматики и управления объектов энергетики;
- непрерывный сбор исходных данных, мониторинг состояния и прогнозирование остаточного ресурса ЭО;
- организация системы диагностики ЭО с использованием современных методов и средств;
- разработка нормативной базы, алгоритмов и программ по использованию результатов технической диагностики для адаптивного изменения режимов эксплуатации, выбора стратегии и планирование ремонтов ЭО;
- внедрение адаптивного управления состояниями процесса эксплуатации групп технологически взаимосвязанного ЭО;
- разработка инвестиционных программ целевого финансирования и контроль выполнения программ внедрения на объектах энергетики средств технической диагностики.

Среднесрочные задачи:

- разработка и реализация программы развития системы технической диагностики действующего ЭО на протяжении жизненного цикла;
- совершенствование методов и средств технической диагностики ЭО под напряжением;
- организация системы диагностики и прогнозирование технического состояния новых видов оборудования и токоведущих частей;
- разработка системы отраслевых регламентов и национальных стандартов по технической диагностике и оценке технического состояния ЭО;
- разработка принципов развития электроэнергетических систем с учетом внедрения технологий Smart Grid, методов управления производственными активами и новых средств контроля, мониторинга и оценки технического состояния ЭО;
- разработка системы высшего образования, непрерывного повышения квалификации по диагностике и неразрушающему контролю ЭО объектов энергетики.

Перспективные задачи:

- производство в России современного высокоэффективного и высоконадежного диагностического оборудования для объектов энергетики;
- формирование структуры глобальной системы диагностики и мониторинга на объектах сетевых и генерирующих компаний России, обладающей требуемой глубиной, высокой наблюдаемостью, адаптивностью и достоверностью;
- реализация системы принципов, процедур и правил управления техническим состоянием ЭО, обеспечивающих требуемую надеж-

ность, безопасность и эффективность работы энергосистем при внедрении технологий Smart Grid.

Вопросы совершенствования теории управления техническим состоянием ЭО тесно связаны с применяемой в отрасли системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Выбор рациональной системы ТОиР ЭО представляет собой комплексную проблему, которая основывается на теории надежности, физических процессах старения и восстановления. Задача системы ТОиР заключается в том, что по истечении определенной наработки в момент предшествующий отказу проводят профилактические ремонты. Чем меньше время между моментами ожидаемого отказа и выполнением профилактического ремонта, тем эффективнее стратегия ТОиР.

Поэтому теория управления техническим состоянием ЭО объектов электроэнергетики включает в себя широкий комплекс задач: организацию диагностирования ЭО; оценку и прогнозирование показателей эксплуатационной надежности ЭО; оптимизацию сроков и объема проведения ТОиР; выбор рациональной стратегии ТОиР; выбор стратегии управления процессом эксплуатации ЭО; планирование ТОиР ЭО по ТС; определения предельного времени эксплуатации ЭО, очередности реконструкции и технического перевооружения энергообъектов, - решение которых позволит повысить эффективность процесса эксплуатации ЭО.

Таким образом, систему мероприятий по совершенствованию теории управления техническим состоянием ЭО объектов энергетики следует рассматривать как комплексное решение проблемы управления производственными активами сетевых и генерирующих компаний электроэнергетики при реализации концепции активно – адаптивных сетей Smart Grid. Решение поставленных задач имеет существенное значение для перехода к системе ремонта ЭО по ТС, а также управления процессом его эксплуатации в зависимости от полученных значений показателей надежности при воздействии эксплуатационных факторов в различных условиях и режимах функционирования. Научно - практическое значение решения этих задач будет состоять в создании моделей, алгоритмов и компьютерных программ, направленных на обеспечение надежности, безопасности и эффективности эксплуатации ЭО электростанций и подстанций путем совершенствования системы ремонтов и процесса эксплуатации на основе учета фактического ТС ЭО, определяемого средствами диагностирования.

Литература

1. **Назарычев А.Н.**, Таджибаев А.И., Титков В.В., Халилов Ф.Х., Андреев Д.А., Пугачев А.А., Шаланда В.А. Основы управления техническим состоянием электрооборудования / Под редакцией А.Н. Назарычева, А.И. Таджибаева. – СПб.: ПЭИПК, 2012. – 292 с.
2. **Назарычев А.Н.**, Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 224 с.

3. **Таджибаев А.И.**, Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Задачи управления техническим состоянием производственных активов объектов энергетики при реализации концепции smart grid // Энергоэксперт, 2012. – № 3 - С. 78 – 81.
4. **Назарычев А.Н.**, Таджибаев А.И. Управление техническим состоянием электроустановок активно-адаптивных энергетических предприятий. – СПб.: ПЭИПК, 2011. – 84 с.

УДК 621.313

Е.М. НОВОСЁЛОВ, инженер;
С.Н. ЛИТВИНОВ, инженер;
А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Разработка способа контроля эксцентриситета ротора асинхронного электродвигателя

В ходе полевых исследований на Ивановской ТЭЦ 2 было обнаружено, что на ряде двигателей 6 кВ уровень вибрации на подшипнике выходит за рамки, установленные в [1]. В табл. 1 приведены значения поперечной вибрации, а так же рабочие параметры двигателей типа ДАМСО-14-10-10. Двигатели этого типа установлены на большинстве дутьевых вентиляторов (ДВ) станции.

Таблица 1. Значения вибрации и рабочие параметры двигателей дутьевых вентиляторов

Механизм	Номинальная частота вращения, об/мин.	Скольжение, о.е	Число пар полюсов	Номинальный ток, А	Рабочий ток,	Вибрация, мкм	
						допустимая	измеренная
ДВ-3А	590	0.0048	5	27,5	17	95	180
ДВ-3Б	590	0.0040	5	27,5	17	95	67
ДВ-4А	590	0.0061	5	27,5	17	95	140
ДВ-4Б	590	0.0050	5	27,5	17	95	38

Как можно заметить, у двух двигателей ДВ-3А и ДВ-4А, представленных в табл. 1, уровень поперечной вибрации существенно превышает установленное нормативное значение. Так как основные рабочие параметры двигателей совпадают, то можно предположить, что существенная разница в уровне вибрации вызвана неким развивающимся дефектом. Проведя спектральный анализ внешних магнитных полей данных двигателей, было установлено, что гармоники эксцентриситета первого порядка на машинах с повышенным уровнем вибрации имеют существенную разницу амплитуд, чего не наблюдается на двигателях с нормальным уровнем вибрации. На рис 1, 2 представлены спектры внешних магнитных полей двигателей ДВ-3А и ДВ-3Б, соответственно, в полулогарифмическом масштабе.

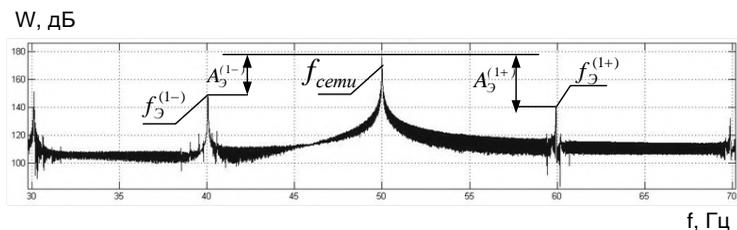


Рис. 1. Спектр двигателя ДВ-3А

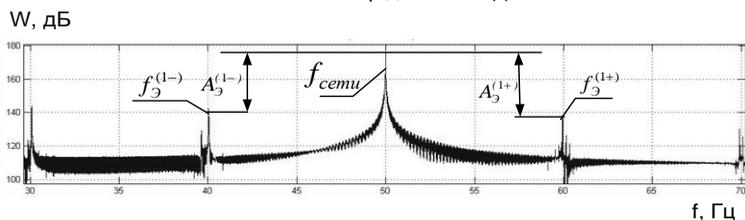


Рис. 2. Спектр двигателя ДВ-3Б

Значения амплитуд гармоник эксцентриситета ротора первого порядка $W_3^{(1\pm)}$, а также разности амплитуд основной гармоники питающей сети W_c и гармоник эксцентриситета ротора $A_3^{(1\pm)} = W_c - W_3^{(1\pm)}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Амплитуды гармоник эксцентриситета ротора двигателей дутьевых вентиляторов типа ДАМСО-14-10-10

Механизм	W_c , Дб	$W_3^{(1-)}$, Дб	$W_3^{(1+)}$, Дб	$A_3^{(1-)}$, Дб	$A_3^{(1+)}$, Дб
ДВ-3А	176	152.3	140	23.7	36
ДВ-3Б	176	142	138	34	38
ДВ-4А	169	158.6	140	10.5	29
ДВ-4Б	164	141.5	145	22.8	19.3

Проанализировав данные, представленные в табл. 2 можно отметить, что у двигателей с повышенной вибрацией (ДВ-3А и ДВ-4А) имеется существенная разность между значениями параметров $A_3^{(1-)}$ и $A_3^{(1+)}$, которая превышает 10 Дб. В свою очередь, у двигателей с допустимым уровнем вибрации (ДВ-3Б и ДВ-4Б), разность между величинами параметров $A_3^{(1-)}$ и $A_3^{(1+)}$ не превышает 5 Дб.

Количество дутьевых вентиляторов с одинаковыми двигателями слишком мало, чтобы строить однозначные выводы, поэтому увеличим

размер выборки за счет двигателей типа ДАМСО-15-12-8, установленных на дымососах. Стоит так же отметить, что уровень вибрации данных двигателей не превышал допустимых значений. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Амплитуды гармоник эксцентриситета ротора двигателей дымососов типа ДАМСО-15-12-8

Механизм	W_0 , Дб	$W_3^{(1-)}$, Дб	$W_3^{(1+)}$, Дб	$A_3^{(1-)}$, Дб	$A_3^{(1+)}$, Дб
Д-3А	160	127	132	33	28
Д-3Б	164	138	135	26	29
Д-4А	166	143	140	23	26
Д-4Б	161	135	130	26	31

Проанализировав результаты, представленные в табл. 3, отмечено, что у всех двигателей разность между параметрами $A_3^{(1-)}$ и $A_3^{(1+)}$, так же как и у двигателей ДВ-3Б и ДВ-4Б (см. табл. 2) не превышает 5 Дб.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что между уровнем вибрации на подшипнике и амплитудами гармоник эксцентриситета ротора имеется прямая взаимосвязь. Вероятнее всего, повышенный уровень вибрации вызван износом подшипника, который привел к увеличению эксцентриситета ротора, что в свою очередь сказалось на изменении амплитуд соответствующих гармонических составляющих внешнего магнитного поля АД. Таким образом, изменение амплитуд гармоник эксцентриситета ротора можно использовать для контроля величины эксцентриситета.

В настоящий момент отсутствует техническая возможность изучения влияния эксцентриситета ротора на гармоники внешнего магнитного поля АД с помощью физического моделирования, поэтому невозможно сформулировать достаточно достоверные критерии оценки величины эксцентриситета. Основная проблема заключается в том, что неизвестна форма внешнего магнитного поля заведомо исправного двигателя. Тем не менее, основываясь на информации, полученной из данных полевых исследований, для оценки величины эксцентриситета предлагается использовать параметры $A_3^{(1\pm)}$, а опасным уровнем считать уменьшение этого параметра на величину более 10 Дб.

Литература

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: РД . – М.: Энас, 2011. – 264 с.

Е.М. НОВОСЁЛОВ, инженер;
С.Н. ЛИТВИНОВ, инженер;
А.С. СТРАХОВ, студент;
А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Разработка метода определения частот гармонических составляющих сигнала на основе автокоррекции времени записи

В настоящее время известны два способа определения частоты колебаний электрического или электромагнитного параметра (тока, напряженности магнитного поля и т.п.):

1. Способ, основанный на выявлении интервалов дискретизации, на которых происходит изменение знака контролируемой величины, то есть частота определяется по количеству переходов контролируемого параметра через 0 [1]. Данный способ используется в устройствах релейной защите и автоматики для определения частоты сети. Он позволяет быстро (за один период) и довольно точно определить частоту. Недостатками данного способа являются: 1) сигнал с исследуемой частотой должен быть мощным на фоне шума и других гармоник; 2) другие гармоники нельзя определить этим способом.

2. Способ, основанный на исследовании спектральной функции сигнала [2]. Его недостатком является зависимость точности определения частоты от времени записи сигнала. Например, для определения скольжения электродвигателя по гармоникам эксцентриситета ротора требуется иметь время записи, достигающее нескольких минут, за которые может произойти изменение нагрузки, смещение датчика и ряд других явлений, приводящих к потере точности измерения.

В данной работе предлагается усовершенствовать второй способ. При этом для более точного определения частоты требуется вместо времени записи сигнала увеличивать частоту дискретизации. В современных цифровых устройствах значение частоты дискретизации может достигать порядка МГц, что позволяет определять частоту любого сигнала с большой точностью с малым временем записи.

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.

Рассмотрим влияние времени записи на амплитудные спектры (далее просто спектры) сигнала $A(t)$. Для этого проанализируем следующие ситуации:

время записи сигнала $T_{\text{зап. } \tau} = 1,005$ с.

время записи сигнала $T_{\text{зап.2}}=1$ 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.

Исходный сигнал $A(t)$ имеет всего одну гармонику с частотой 100 Гц.

В спектре, который был получен при времени записи сигнала $T_{\text{зап.1}}$ (см. рис. 1, а), присутствует целый ряд ярко выраженных гармонических составляющих. Наиболее выраженная гармоника имеет амплитуду 3,3 и частоту 100,5 Гц, что не соответствует параметрам исходного сигнала.

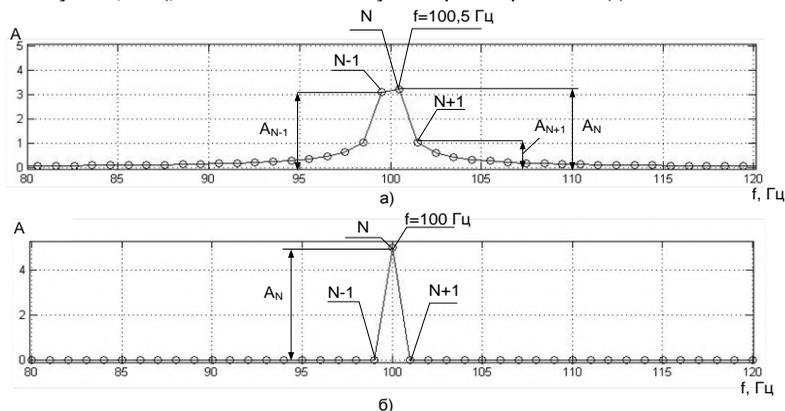


Рис. 1. Спектр сигнала $A(t)$ при различном времени записи сигнала $T_{\text{зап}}$: а – $T_{\text{зап.1}} = 1,005$ с; б – $T_{\text{зап.2}} = 1$ с

Спектр, который был получен при времени записи $T_{\text{зап.2}}$ (см. рис. 1, б), имеет одну ярко выраженную гармонику с частотой, равной 100 Гц и амплитудой $A_N=5$, что полностью соответствует заданному сигналу.

Анализ спектров сигнала, полученных при различных продолжительностях времени записи, позволил сделать следующий вывод: **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:

$$T_{\text{зап.}i} = T_{\text{зап}} - i \cdot \frac{1}{F_d} \quad (1)$$

где $T_{зап.i}$ – время записи сигнала после i -го шагов уменьшения времени записи относительно исходного значения $T_{зап}$.

На каждом шаге уменьшения времени записи необходима оценка величины растекания спектра, критерием которой может служить величина V , определяемая следующим образом:

$$V = (A_N - A_{N-1}) \cdot (A_N - A_{N+1}). \quad (2)$$

Рассмотрим, при какой величине V эффект растекания спектра будет минимален. На рис. 2 – зависимость величины V от номера шага уменьшения времени записи сигнала i .

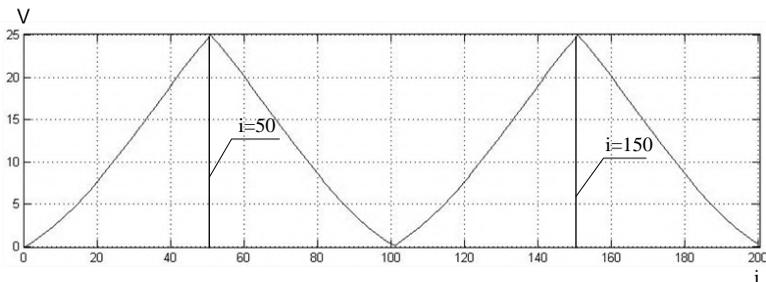


Рис. 2. Зависимость величины V от номера шага уменьшения времени записи сигнала i

Частота N -ой гармоники совпадает с частотой сигнала $A(t)$, равной $f=100$ Гц на 50 и 150 итерации, при этом величина V достигает своих максимальных значений (см. рис. 2). Таким образом, эффект растекания спектра минимален при максимальном значении параметра V . Если это условие выполняется, то можно говорить о том, что погрешность определения частоты минимальна.

Для минимизации данной погрешности разработан алгоритм автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС), позволяющий подобрать для любой гармонической составляющей спектра оптимальное время записи, при котором погрешность определения частоты минимальна.

Расчёты показали, что при применении алгоритма АВЗС время записи сигнала может быть доведено до уровня порядка нескольких десятых долей секунды. Таким образом, разработанный способ позволяет достаточно быстро определять частоту любой гармоники сигнала без потери точности.

Литература

- Гуревич В. И. Цифровые реле скорости изменения частоты и проблема их тестирования [Электронный ресурс]: статья / В. И. Гуревич. – Режим доступа: <http://relay-protection.ru/content/view/104/11/>.

З. Назарычев А. Н. Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя / А.Н. Назарычев [и др.] // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ; вып. 9, – М.: Энергоатомиздат, 2009. С. 260-266.

УДК 621.313

Е. М. НОВОСЁЛОВ, инженер;
С. Н. ЛИТВИНОВ, инженер;
А. С. СТРАХОВ, студент;
А. А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Анализ практической эффективности применения алгоритма автокоррекции времени записи сигнала при определении скольжения электродвигателя

В результате теоретической оценки эффективности алгоритма автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС) было установлено, что для определения скольжения по гармоникам эксцентриситета ротора (ГЭР) достаточно времени записи, не превышающего 0.27 с. Таким образом, наблюдается многократное (примерно в 10000 раз) уменьшение времени записи сигнала по сравнению со способом определения частоты, который описан в [1].

В данной работе рассматривается вопрос, какой эффект дает применение алгоритма АВЗС при определении скольжения на реальном двигателе.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан специальный стенд. Объектом исследований является трехфазный асинхронный электродвигатель 3ВР71-2 с номинальной мощностью $P_{ном} = 250$ Вт, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Характеристики исследуемого двигателя 3ВР71-2**

Мощность, Вт	Номинальная частота вращения, об/мин	Число пар полюсов	Число стержней
250	2880	1	19

В целях создания ступенчатого регулирования нагрузки на валу ротора, к двигателю подсоединен генератор постоянного тока, к которому подключена нагрузка, состоящая из ламп накаливания.

Для измерения магнитного поля в воздушном зазоре двигателя используется внутренний индуктивный датчик (ВИД), который представляет собой виток провода, намотанный на ярмо статора. Для измерения текущего скольжения электродвигателя используется оптический тахометр. Сигнал с датчиков поступает в компьютер через специальную

плату ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов, выполняющую аналого-цифровое преобразование поступающего сигнала. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

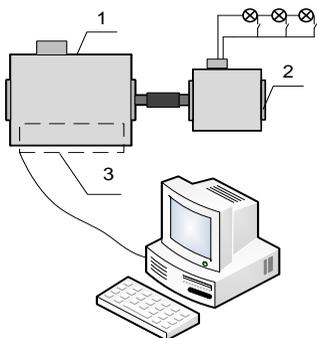


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда.

Условные обозначения: 1 – асинхронный двигатель; 2 – генератор постоянного тока с подключенными к нему лампами накаливания; 3 – ВИД

При этом осуществлялся контроль частоты вращения вала ротора АД с помощью оптического тахометра.

В ходе исследования на экспериментальном двигателе было произведено измерение скольжения следующими способами:

1. с помощью оптического тахометра;
2. по зубцовым гармоникам ротора (ЗГР) и ГЭР первого порядка, присутствующими в воздушном зазоре [1];
3. по ГЭР первого порядка, присутствующими в воздушном зазоре, с применением алгоритма АВЗС.

Измерения проводились при различной нагрузке на валу ротора со временем записи сигнала от 1 до 20 с.

Результаты измерений приведены в табл. 2–4.

Таблица 2. Значения скольжения при нагрузке $0.5P_{НОМ}$

Время записи сигнала, с	Скольжение по данным оптического тахометра	Скольжение, определенное по ЗГР	Скольжение, определенное по ГЭР	Скольжение, определенное по ГЭР с использованием алгоритма АВЗС
20	0,021	0,0209	0,0207	0,021
10		0,0204	0,018	0,021
7		0,0202	0,0171	0,0208
5		0,0181	0,018	0,0208
3		0,0098	0,0133	0,0208
1		0,0091	0,0132	0,0209

Таблица 3. Значения скольжения при нагрузке $P_{ном}$

Время записи сигнала, с	Скольжение по данным оптического тахометра	Скольжение, определенное по ЗГР	Скольжение, определенное по ГЭР	Скольжение, определенное по ГЭР с использованием алгоритма АВЗС
20	0.034	0.0345	0.0338	0.0349
10		0.0341	0.0320	0.0349
7		0.034	0.0314	0.0348
5		0.034	0.032	0.0348
3		0.0203	0.0266	0.0347
1		0.0136	0.0198	0.0350

Таблица 4. Значения скольжения при нагрузке $1.5 P_{ном}$

Время записи сигнала, с	Скольжение по данным оптического тахометра	Скольжение, определенное по ЗГР	Скольжение, определенное по ГЭР	Скольжение, определенное по ГЭР с использованием алгоритма АВЗС
20	0.05	0.05	0.0496	0.0501
10		0.0499	0.0480	0.0501
7		0.0498	0.0458	0.05
5		0.0497	0.0441	0.05
3		0.0474	0.0401	0.05
1		0.0464	0.04	0.0508

Уменьшение времени записи сигнала вплоть до 1 с не оказало значительного влияния на результат измерения скольжения при использовании алгоритма АВЗС в отличие от других способов. Результаты измерения скольжения, представленные в табл. 2–4, наглядно показывают, что применение алгоритма АВЗС даёт реальный положительный эффект.

Литература

4. Назарычев А. Н. Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя / А.Н. Назарычев [и др.] // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ; вып. 9, – М.: Энергоатомиздат, 2009. С. 260-266.

Выбор кабелей с учетом действия тока короткого замыкания на основе технико-экономического расчета

При проектировании распределительных электрических сетей низкого напряжения приходится в большом объеме выполнять расчеты, связанные с выбором уставок защитных аппаратов с проверкой кабелей по термической стойкости и на возгорание. С учетом объемов электрических сетей автоматизация их расчетов становится актуальной.

В системе собственных нужд ТЭС проектировщикам часто приходится выбирать проводники не по допустимому току, а по условиям термической стойкости или возгоранию при коротких замыканиях, что приводит к существенному увеличению сечения проводников. В этом случае оптимизация структуры сети совместно с минимизацией приведенных затрат может позволить получить существенно лучшие решения, чем традиционно применяются в настоящее время без оптимизации.

Применение экономического критерия при выборе расчетных условий для проверки кабелей по условию возгорания позволит получить лучшие показатели сети при оптимизации сечений жил кабелей.

В работе рассматривается вопрос необходимости учета дуги при проверке кабелей на возгорание для обоснования уменьшения сечения КЛ. С учетом того, что вероятность металлического (не дугового) короткого замыкания, хоть и не велика, но вполне конечна, вопрос о том учитывать или не учитывать возможность дуги при КЗ для задач проверки на возгорание должна решаться на основе технико-экономического расчета. В работе сделана попытка такого расчета. Анализ задачи показал, что на первый взгляд получается, что основная задача это проверка кабеля, проходящего по трассе, на невозможность возгорания при КЗ. Если такая возможность окажется реальной, то ущерб от пожара на кабельной трассе не компенсируется сокращением затрат за счет применения кабеля с меньшим сечением.

С другой стороны, кабель с повышенным сечением позволит снизить потери в низковольтной распределительной сети. Для того, чтобы была возможность принимать обоснованные решения при проектировании, предполагается разработка соответствующей функциональности в программном комплексе EnergyCS Электрика.

Исследование замыканий в районных распределительных сетях с изолированной нейтралью

Замыкания на землю в районных распределительных сетях (РЭС) с изолированной нейтралью являются преимущественным видом повреждений. До 70% всех повреждений в РЭС приходится именно на однофазные замыкания, что подтверждается многими исследователями и статистической отчетностью в РЭС.

Существует большое количество, как технических решений проблемы обнаружения замыканий, так и предложенных вариантов исполнения релейной защиты. Однако, несмотря на обилие достоинств у предлагаемых технических решений присутствуют и недостатки, среди которых можно выделить отсутствие универсальности, т.е. возможности применения предлагаемых решений в РЭС любой конфигурации.

Авторами был произведен анализ режимов работы РЭС различной конфигурации от простейших радиальных схем до более сложных разветвленных, и предпринята попытка использования наличия высших гармоник (ВГ), как одного из универсальных критериев для определения появления и оценки параметров замыканий.

При этом определение расстояния до места повреждения весьма проблематично, т.к. на уровень ВГ влияет неизвестное переходное сопротивление в месте замыкания.

Между тем есть вполне устойчивый признак замыкания, который менее чувствителен к величине переходного сопротивления и в то же время принципиально зависит от удаленности замыкания – это «резонансная» частота электропередачи. Учитывая, что электропередачу можно представить в виде индуктивностей и поперечных емкостей рис.1, то возможно предположить проявление резонансных явлений на определенных частотах тока (напряжения). На рис.2 в качестве примера представлена частотная характеристика одной из моделируемых линий электропередачи. При изменении частоты источника напряжения на определенных частотах возникают резонансные явления. Именно это свойство линий и было положено в основу исследования.

Источником ВГ в линии электропередачи может служить перемежающаяся дуга, которая часто возникает при различных видах замыканий в линии. Причем дуга генерирует широкий спектр частот, в том числе и килогерцовый диапазон. Данный диапазон вполне приемлем, поскольку, обычно присутствующие шумы в линиях на данных частотах имеют малую амплитуду и, соответственно, возможно выделение интересующе-

го всплеска частот. Во вторых, для выделения данного диапазона частот возможно использование стандартного диагностического оборудования.

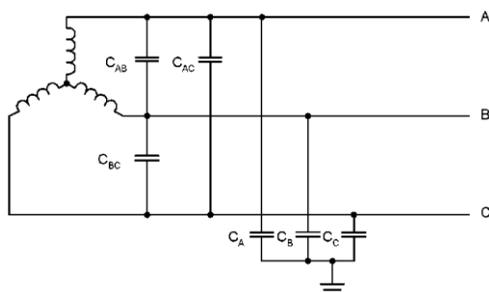


Рис. 1. Модель электропередачи

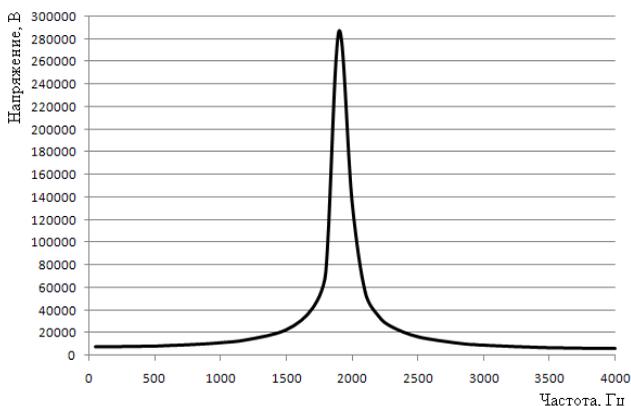


Рис. 2. Частотная характеристика электропередачи

Моделирование параметров электропередачи осуществлялось в программном продукте Matlab. Процесс замыкания возможно моделировать несколькими способами: с помощью ключа, либо источником высших гармоник E_n , который обладает внутренним активным сопротивлением r , как в нашем случае. На рис. 3 представлен один из результатов моделирования. На графике показано увеличение амплитуды напряжения на резонансной частоте, что возможно использовать в качестве диагностического признака.

Вывод

Воздушные линии электропередачи на напряжении 6–10 кВ обладают явно выраженными максимумами в частотных характеристиках в области нескольких десятков килогерц, что делает перспективным их использование для обнаружения факта однофазных замыканий на землю, сопровождающихся перемежающейся дугой.

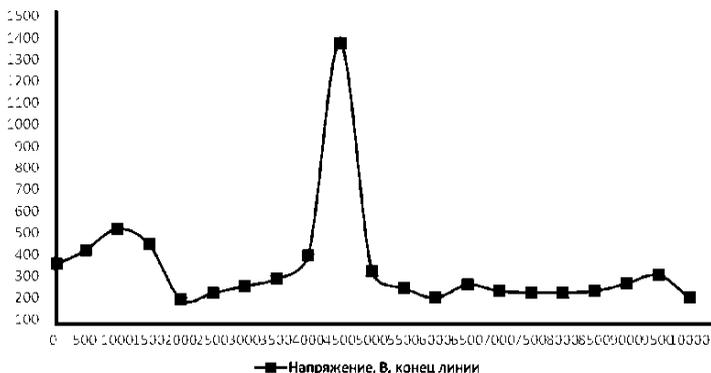


Рис. 3. Резонансные явления в линии при замыкании

Литература

1. **Определение** места замыкания на землю на воздушных линиях 6 – 35 кВ / Л.И. Сарин, А.И. Шалин, М.В. Ильиных и др. // Мат. IV Всеросс. научн.-техн. конф. «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6 – 35 кВ». – Новосибирск, 2007.
2. **Шалин А. И.** Замыкания на землю в линиях электропередачи 6 – 35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты / Новости электротехники. – 2005, №1.

УДК 621.31

Г.В. КВАШНИНА, аспирант
(ЛГТУ, Липецк)

Повышение эффективности функционирования сложных систем посредством применения избыточностей

Сложные системы являются многофункциональными комплексами с иерархической структурой. С целью повышения эффективности их функционирования используется структурная, временная и информационная избыточность. Избыточности могут быть как внутренними, так и внешними. Например, структурная избыточность обеспечивается или перегрузочными способностями оборудования, или дополнительным оборудованием, или резервными источниками энергии. Избыточностью могут обладать как отдельные единицы оборудования, так и их соединения [1].

Из всех избыточностей структурная избыточность систем является наиболее изученной. Она широко применяется во всех отраслях промышленности, в том числе и электроснабжении. Более сложным в процессе анализа систем является рассмотрение временной избыточности. Она предусматривает использование добавочного времени для выполнения объектом его заданных функций. В этом случае не каждый отказ элементов приводит к перерыву в функционировании системы. Происходит это за счет накопителей, которые позволяют создать запас времени для устранения отказов. Накопителями могут оснащаться как технологические, так и электрические системы. В технологических системах в качестве накопителей служат бункеры. Для электрических систем для этих целей предполагается использовать резервные источники питания, такие как магнитогидродинамические (МГД) генераторы, генератор-двигатель, аккумуляторные батареи и др. Использование накопителей позволяет обеспечить временную избыточность систем. Таким образом преодолевается период наработки системы, увеличивается интервал её работоспособности. В результате частота отказов для оборудования, как технологического, так и электрического, подвергшегося временному резервированию, уменьшится.

Основным назначением информационной избыточности является управление распределением всех видов избыточностей. Для этих целей служат специальные системы управления и защиты. Оснащение ими основных систем не гарантирует полное устранение отказов в этих системах, в первую очередь и в самих системах управления. Наибольшей эффективностью обладает система, в которой рационально объединены все три вида избыточности. В общем случае избыточности не являются постоянными величинами, они видоизменяются и могут переходить из одного вида в другой.

Последнее время для анализа крупных систем во всем мире используется теория ценозов. Именно подход, связанный с избыточностью систем, показывает, в каких случаях может быть использован этот подход. В конечном итоге это позволяет прийти к выводу, по какому пути должна развиваться система, и какие мероприятия для повышения её безотказности являются наиболее эффективными. Исследование, основанное на анализе применения избыточностей, справедливо для любых сложных систем, и может решать задачи как технического, так и экономического характера.

Работа имеет прикладной характер, применимый для любой отрасли. Все принципы избыточности для технических систем осуществимы с помощью уже существующего оборудования и технологий, но до настоящего времени фундаментальных исследований оценки повышения эффективности функционирования сложных систем не проводилось. Рассматривая экономическую сторону исследования, необходимо отметить, что эффективность от внедрения описанных мероприятий зависит от того объекта, на котором осуществится его внедрение. Ос-

новой задачей внедрения избыточности на производстве является снижение вероятности возникновения отказа в работе систем. На любом производстве даже один отказ или остановка оборудования способны нанести значительный материальный ущерб. Поэтому несмотря на учёт стоимости внедряемого оборудования, экономический эффект очевиден, и исследуемое мероприятие несёт существенные экономические выгоды предприятию.

Литература

1. **А.А. Шпиганович**, С.А. Ляпин, Г.В. Квашнина Формирование параметров элементов, определяющих функционирование технических систем. - Липецк: Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. №1 С.3 - 5

УДК 621.315

Л.И. СМАКОВА, студент,
В.К. КОЗЛОВ, д.ф.-м.н., профессор
(ФГБОУ ВПО «КГЭУ») г. Казань

Сравнительный анализ методов определения влагосодержания трансформаторного масла

В процессе эксплуатации маслonaполненного оборудования, под воздействием химических и физических процессов, температуры, электрического поля ухудшаются свойства трансформаторного масла (ТМ), что приводит к его старению. Основными показателями электроизоляционных свойств масла являются электрическая прочность (пробивное напряжение) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Чем больше в масле содержится влаги, мыла, воздуха, шлаков и иных загрязнений, тем меньше становится пробивное напряжение и увеличивается $\text{tg}\delta$. Под действием электрического поля примесные частички выстраиваются в цепочки по силовым линиям поля. В таких системах величина пробивного напряжения гораздо меньше, чем в чистом и сухом масле.

ТМ обладает таким свойством, как гигроскопичность [1]. Вода в масле может находиться как в растворённом виде, не оказывая значительного влияния на электрическую прочность, так и в виде отстоя на дне резервуара, а также в состоянии эмульсии. В присутствии воды в состоянии эмульсии резко возрастает $\text{tg}\delta$ и ухудшается электрическая прочность. Влагосодержание является нормируемой величиной, которая составляет 0,0002% (2 г/т или 20 ppm). Определить такую малую долю очень сложно. На сегодняшний день наиболее распространён метод определения количества воды титрованием по Карлу Фишеру (КФ) [2] двух типов.

Волюметрическое титрование по КФ проводят с помощью специального оборудования (титраторов) и реактивов КФ. В ячейке титрова-

ния к ТМ добавляется реактив КФ, вступающий в реакцию с водой. Объем выделившегося газа пропорционален количеству воды в пробе.

При кулонометрическом титровании по КФ определенное количество ТМ вводится в ячейку с йод содержащим реагентом, на электроды в ячейке подается поляризационный потенциал. При взаимодействии воды с йодом появляются свободные ионы, что вызывает рост проводимости. Для поддержания заданного тока поляризации требуется снижение напряжения, поданного на электроды. Завершают титрование после срабатывания электрометрического детектора конечной точки. Влагосодержание определяют по закону Фарадея, согласно которому, количество воды пропорционально величине заряда. Диапазон определения влаги варьируется от 1 ppm до 5%, что значительно точнее волуметрического титрования. Чувствительность метода 0,0002% воды по массе. Анализ данным методом можно провести достаточно быстро, что является большим преимуществом. Наиболее значительный недостаток – сложность аппаратуры.

Ранее, и довольно длительное время применяли гидридкальциевый метод [3]. Суть которого заключается во взаимодействии гидрида кальция с растворенной в ТМ водой. По завершении реакции измеряют объём выделившегося газа и вычисляют массовую долю растворенной воды. Значительным недостатком гидридкальциевого метода является его нечувствительность к эмульсионной воде.

Еще один распространенный метод определения влагосодержания ТМ – это хроматографический метод [4]. Образец масла вводят в испаритель хроматографа, для получения влаги в газообразном виде (температура испарителя 250 – 300 °С). Затем газом – носителем, гелием, она переносится в хроматографическую колонку. Замеряется площадь пика и рассчитывается количество воды. К достоинствам этого метода можно отнести высокую точность. Однако метод является сложным, т.к. сложно выбрать диапазон данных хроматограммы.

Довольно точным является масс-спектрометрия (точность до 0,0001%) [5]. Метод заключается в исследовании набора пиков масс-спектра. В ионном источнике генерируются свободные ионы из молекул анализируемого вещества. Затем эти ионы попадают в масс-анализатор, где происходит разделение ионов по массам. При дальнейшей регистрации ионов выявляются пики, которые подлежат исследованию.

Сочетание термического анализа и кулонометрии позволило разработать анализатор с чувствительностью в несколько ppm [6]. После взвешивания на микровесах образец ТМ постепенно нагревают во встроенной печи до 400 °С. Вода, извлекаемая из образца, с помощью инертного газоносителя транспортируется к электрохимическому датчику. В нем газ, содержащий пары воды, проходит над слоем фосфорного ангидрида. Между молекулами абсорбированной воды и слоем фосфорного ангидрида происходит электролитическая диссоциация.

Измеренный электрический ток находится в прямом соотношении с массой воды, выпаренной из этого образца.

В методе фото-акустической спектроскопии тепловое излучение от термостабилизированной проволоки фокусируется параболическим зеркалом, проходит через диски с прорезями и фильтрами, попадает в камеру с газом. Излучение вызывает пульсирующее расширение газа, которое фиксируется чувствительным микрофоном. Данный метод не требует расходных материалов, калибровок и специальной подготовки пробы. Полное время анализа длится около получаса.

Наряду с широко распространенными и используемыми методами, внедряются новые разработки, ведется тестирование новых реактивов для титрования по КФ [7]. В данной работе обсуждаются также достоинства, недостатки и перспективы применения на практике методики определения доли воды в ТМ с помощью спектроскопии ядерного магнитного резонанса [8].

Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
2. ГОСТ 14870–77. Продукты химические. Методы определения воды.
3. ГОСТ 7822–75. Масла и смазки. Метод определения растворенной воды.
4. РД 34.43.107-95. Методические указания по определению содержания воды и воздуха в трансформаторном масле.
5. Хмельницкий Р.А., Бродский Е.С. Методы аналитической химии. Хромато-масс-спектроскопия. – М.: Химия, 1984. – 10 с.
6. URL: <http://vladisart.ru/products/languages/water-search.html>
7. URL: <http://www.riedeldehaen.com/> & <http://galachem.ru/> «Руководство по применению реактивов HYDRANAL для титрования по Карлу Фишеру» 2010. 81 с.
8. Kozlov V., Turanov A. Transformer oil and modern physics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2012. – Vol. 19. – Issue 5. – p. 1485.

УДК 621.316

А.А. ГАЛИМОВА, к.т.н., доцент
(СамГТУ) г. Самара

Выбор мощности трансформатора при проектировании систем электроснабжения.

Одной из основных задач при проектировании систем электроснабжения является выбор оборудования трансформаторной подстанции распределительных сетей 6-10 кВ. При этом трансформатор является основным устройством, влияющим на выбор электрических аппаратов, как высокого, так и низкого напряжения.

В качестве основных критериев выбора силового трансформатора при проектировании принимаются класс напряжения, расчетная

мощность нагрузки, подключаемой к подстанции. Если к системе электроснабжения подключены потребители 1 или 2 категорий, выполняется также проверка работы трансформатора в аварийном режиме. Мощность трансформатора по условию выбора должна быть не меньше, чем расчетная мощность нагрузки.

В данной статье рассмотрен срок службы трансформатора. Проектирование и монтаж электрических сетей и трансформаторной подстанции для электроснабжения предприятия, как правило, является одной из существенных расходных статей потребителя электроэнергии, особенно в энергоемких технологиях и производствах. Поэтому важно знать экономическую и техническую эффективность затрат на сооружение системы электроснабжения. При этом паспортные данные электрооборудования, представляющие интерес для специалистов-энергетиков и электромонтажников, практически не содержат информации для специалистов других отраслей, то есть для потребителей.

На самом деле срок службы трансформатора нельзя оценить однозначно. Можно говорить о предполагаемом сроке службы – некоторой условной величине, принимаемой для непрерывной постоянной нагрузки при нормальной температуре окружающей среды и номинальных условиях эксплуатации. Основным параметром, существенно влияющим на срок службы трансформатора и электрооборудования в целом, является коэффициент загрузки трансформатора β .

В распределительных трансформаторах мощностью не более 2500 кВА с естественным масляным охлаждением типа ОН в установленном режиме температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляцией, не должна превышать 140°C, температура, при которой обеспечивается нормальный срок службы трансформатора 98°C. Превышение температуры на каждые 6°C более 98°C увеличивает скорость износа изоляции в 2 раза – так называемое 6-градусное правило – а, следовательно, значительно уменьшает срок службы трансформатора. Известно, что в 43,6% случаев отказ работы трансформаторов мощностью до 2500 кВА происходит по причине нарушения изоляции [1]. Основным компонентом, влияющим на температуру наиболее нагретой точки, является коэффициент загрузки β .

Расчет температуры наиболее нагретой точки выполняется в соответствии в графиком нагрузки потребителя для двух режимов – установившийся тепловой режим и неустановившийся, когда нагрузка изменяется в течении интервала времени [2]. Однако, на этапе проектирования целесообразно выполнять расчет для нагрузки, определяющей отпусчную мощность, в том числе и в аварийном режиме для предприятий, имеющих потребителей 1 или 2 категорий, так как это режимы максимальной загрузки трансформатора. Тогда температура в установленном тепловом режиме для трансформаторов в охлаждением ОН будет определяться по следующей зависимости:

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{hr} \left[\frac{1+R\beta}{1+R} \right] + H_{gr} \cdot \beta^6 \quad (1)$$

где Θ_a – температура охлаждающей среды, °С; $\Delta\Theta_{br}$ – превышение температуры масла в нижней части обмотки, °С; R – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода при номинальной нагрузке; β – коэффициент загрузки; H_{gr} – градиент температуры наиболее нагретой точки, °С; y – показатель степени обмотки.

Согласно ГОСТ 14209-97 при расчете для трансформаторов с системой охлаждения ON необходимо применять тепловые характеристики, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Тепловые характеристики трансформаторов

Θ_a, C°	$\Delta\Theta_{hr}, C^\circ$	R	H_{gr}, C°	y
20	78	5	23	1,6

Подставив приведенные в таблице характеристики и коэффициенты, получим зависимость максимальной температуры наиболее нагретой точки от коэффициента загрузки трансформатора:

$$\Theta_h = 65 \cdot \beta + 23 \cdot \beta^{1,6} + 33 \quad (2)$$

На основании рассчитанных значений температуры наиболее нагретой точки можно определить некоторые показатели термического износа изоляции, например:

- относительная скорость термического износа изоляции

$$V = A \cdot 2^{\frac{\Theta_h - 98}{6}}, \quad (3)$$

где A – постоянная, соответствует сроку службы при $t = 0^\circ$, $A = 0,112$; срок службы определяется экспоненциальным отношением Монтсингер

$$\text{Срок службы} = e^{-\rho \Theta_h} \quad (4)$$

где ρ – постоянная, согласно [1] $\rho = 0,1155^\circ\text{C}^{-1}$.

Автором в качестве количественного критерия предлагается относительное изменение срока службы трансформатора N от коэффициента загрузки, то есть, как изменяется срок службы трансформатора в зависимости от загрузки по сравнению с базовым значением β . Базовое значение коэффициента загрузки – значение, которое обеспечивает температуру наиболее нагретой точки 98°C .

Расчеты показали, что температура 98°C обеспечивается при загрузке трансформатора на 76,8%, что соответствует значению $N = 1$. Принятый экономический коэффициент загрузки $\beta = 0,6 \div 0,7$ соответствует увеличению срока службы в $6 \div 2$ раза. Если потребитель электроэнергии не планирует увеличивать объемы производства, при выборе мощности трансформатора для подстанции достаточно ориентироваться на экономический коэффициент загрузки. Если трансформаторная подстанция проектируется для электроснабжения новостроек,

целесообразно руководствоваться коэффициентом загрузки $\beta = 0,4 \div 0,5$, что соответствует режиму работы трансформатора с максимальным КПД. Новостройки со временем увеличивают потребление электроэнергии за счет развития инфраструктуры, при этом также возникает проблема наличия свободной территории для новой подстанции, особенно в условиях городской застройки.

Стоимость подстанции формируется из стоимости электрооборудования в РУ высокого и низкого напряжения, корпуса или модульного здания и непосредственно трансформатора. Так как электрические аппараты высокого и низкого напряжения имеют высокие параметры по электродинамической и термической стойкости токам короткого замыкания, производители выпускают подстанции для диапазонов мощностей, например, в габаритах до 400 кВА устанавливают трансформаторы от 63 кВА до 400 кВА. Стоимость самого трансформатора составляет порядка 20% стоимости всей подстанции. Поэтому увеличение мощности трансформатора на одну ступень не приведет к существенному удорожанию подстанции, но значительно увеличит срок службы трансформатора.

Литература

1. Цирель Я.А., Поляков В.С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электрических сетях. – Л.: Энергоатомиздат, 1985г.
2. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91). Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.

УДК 621.316.925

В.П. ЕРУШИН к.т.н., доцент,
И.П. ТИМОФЕЕВ, к.т.н., доцент,
М.М. КОРПИН, магистрант
(НГТУ), г. Новосибирск

Защита обмотки возбуждения генератора от замыкания на корпус

Замыкание обмотки возбуждения на корпус ротора в одной точке не представляет опасности для генератора. Однако замыкание во второй точке приводит к закорачиванию части обмотки возбуждения и к искажению магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения, что сопровождается сильной вибрацией генератора. На турбогенераторах после выявления замыкания в одной точке должна предусматриваться защита от замыкания на корпус во второй точке, действующая на сигнал или на отключение (для генераторов большой мощности). Особую опасность представляет замыкание во второй точке для гидрогенераторов, поэтому они выводятся из работы при возникновении замыкания в одной точке, так как достаточно совершенных защит от замыкания во второй точке в настоящее время нет [1].

Принцип действия выпускаемых в настоящее время защит от замыкания в одной точке основан на использовании наложенного от постороннего источника на обмотку возбуждения тока пониженной частоты (16-25 Гц). Защита реагирует на активную часть тока, пропорционального переходному сопротивлению в месте повреждения изоляции. Недостатком этих защит является необходимость настройки устройства компенсации на конкретное значение емкости цепей возбуждения, зависимость чувствительности защиты от емкости цепей возбуждения, довольно низкий уровень контролируемых значений сопротивления изоляции (до 80 кОм). Тогда как в качестве допустимого сопротивления изоляции как обмотки статора, так и обмотки ротора в [2] приводятся значения не менее 500 кОм.

В связи с этим задача совершенствования защит от замыкания обмотки ротора на корпус остается актуальной. Принцип действия разработанной в НГТУ микропроцессорной защиты основан на использовании постоянного наложенного напряжения, что позволило исключить недостатки, свойственные защитам с использованием переменного наложенного напряжения.

Основные функции защиты:

- мониторинг уровня изоляции ротора генератора в рабочем режиме, а также перед его включением в работу;
- сигнализация о снижении сопротивления изоляции ниже нормального уровня (1-я ступень);
- отключение генератора при металлическом замыкании на корпус
- или сигнализация (если допустим длительный режим работы при замыкании обмотки ротора на корпус в одной точке);
- определение электрической удаленности точки замыкания вдоль обмотки ротора;
- отключение генератора при замыкании на корпус в двух точках обмотки ротора.

На рис.1 приведена поясняющая схема замещения для определения сопротивления изоляции $R_{из}$.

При невозбужденном генераторе ключ KS включен постоянно, и сопротивление изоляции вычисляется по формуле:

$$R_{из} = \frac{U_H}{I_H} - R_1. \quad (1)$$

При возбужденном генераторе производится поочередное измерение токов утечки по сопротивлению изоляции ($R_{из}$) при подключении источника наложенного напряжения E_H к зажиму «минус» обмотки возбуждения и его отключении. Для коммутации источника наложенного напряжения используется высоковольтный электронный ключ (KS), управляемый микроконтроллером. Тогда:

$$R_{us} = \frac{U_H + I_{u1}(R_1 + R_2) - I_{u2}R_1}{I_{u2} - I_{u1}}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{I_{u2}(R_{us} + R_1) - U_H}{U}. \quad (3)$$

Здесь: I_{u2} – измеренный устройством ток при замкнутом ключе, формируемый источником наложенного напряжения и частью напряжения возбуждения αU ;

I_{u1} – измеренный устройством ток при разомкнутом ключе, формируемый только частью напряжения возбуждения αU .

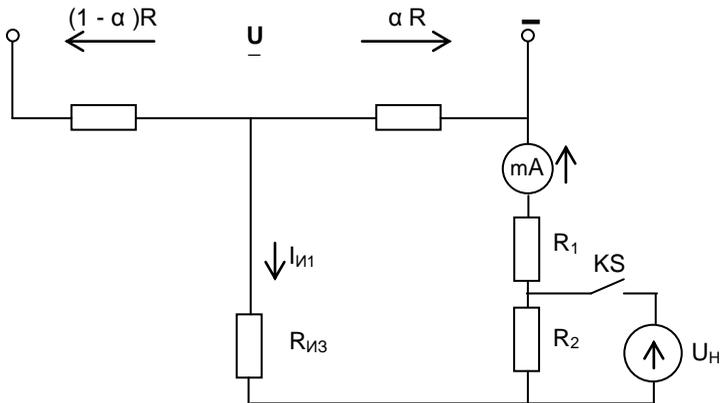


Рис. 1. Схема замещения для расчета сопротивления изоляции ротора

Здесь: U – напряжение обмотки возбуждения; U_H – наложенное напряжение; α – коэффициент, определяющий удаленность точки обмотки ротора со сниженным сопротивлением изоляции; I_{u1} – измеренный ток в контуре при замкнутом ключе KS ; R – Сопротивление обмотки ротора.

В штатном режиме работы генератора замыкание во второй точке определяется по изменению коэффициента α после выявления первого замыкания, если при первом замыкании коэффициент α не равен 1 и не равен нулю. Опасность для генератора такого режима представляет металлическое замыкание. Поэтому в алгоритме действия защиты предусматривается выполнение следующих операций:

- фиксируется значение коэффициента α_1 при снижении сопротивления изоляции ниже минимального значения R_{min} , заданного отдельной уставкой R_ϕ ;

- разрешается действие защиты при отклонении текущего значения α от зафиксированного α_1 свыше заданной уставки по этому параметру, если выполняется условие $R < R_\phi$.

Период такта переключения ключа определяется емкостью цепей возбуждения относительно земли и требуемой точностью измерения максимального значения сопротивления изоляции обмотки возбуждения (задается на уровне 20 Мом). Мониторинг состояния изоляции осуществляется путем формирования протоколов при отклонении сопротивления изоляции от текущего значения на ΔR (задается уставкой). Кроме того, периодическое подключение/отключение источника наложенного напряжения обуславливает переходные процессы заряда и разряда емкости обмотки возбуждения, наличие которых позволяет контролировать исправность цепи наложенного напряжения при сопротивлении изоляции выше 30 Мом.

Выводы

1. Использование постоянного наложенного тока при реализации алгоритмов защиты обмотки возбуждения от замыкания на корпус обеспечивает широкий диапазон контролируемых значений сопротивления изоляции (от единиц кОм до 20 Мом), позволяет вести мониторинг сопротивления изоляции в рабочем режиме.

2. Защита контролирует удаленность первой точки замыкания на корпус, по изменению которой фиксирует замыкание во второй точке и производит отключение генератора.

Литература

1. **Федосеев А.М.**, Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. - 528 с.
2. **Правила** устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – Красноярск, 1998. – 656 с.

УДК 621.316

А.В. ШАГИДУЛЛИН, аспирант,
Е.И. ГРАЧЕВА, к.т.н., доцент,
А.В. РЫБАКОВА, аспирант
(КГЭУ), г.Казань

Зависимость срока службы автоматических выключателей от эксплуатационных характеристик

В аппаратах, рассчитанных на большое число включений и отключений (выключатели, контакторы, контроллеры), применяют конструкции контактов с перекачивающимися поверхностями. Такие контакты замыкаются и размыкаются, соприкасаясь одним участком поверхности, где происходит горение электрической дуги и наблюдается повышенный механический износ. Поэтому в зависимости от износа контактов меняется и их сопротивление. Одним из способов оценки срока службы контактов является способ по результатам частичных испытаний [Л. 1].

На основании экспериментальных данных сопротивлений контактов автоматических выключателей при номинальных токах $I_H = 16$ А и $I_H = 50$ А строится гистограмма статистического распределения плотности значений сопротивлений в виде столбцов (Рис. 1).

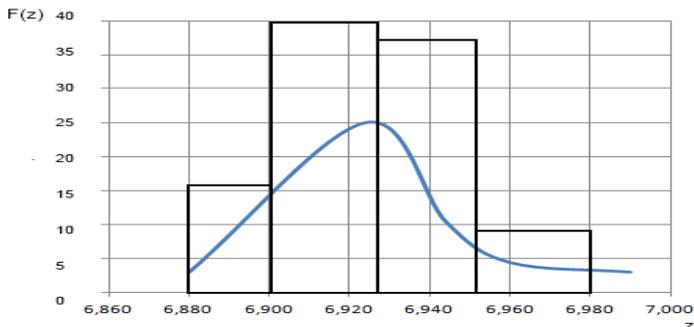


Рис. 1 Аппроксимация плотности распределения значений сопротивления контактных соединений автоматического выключателя с $I_H = 50$ А

Средняя плотность распределения $f_i^*(z)$ находится по выражению:

$$f_i^*(z) = \frac{m_i}{n\Delta z},$$

где m_i – частота равная числу результатов измерений, n – общее кол-во измерений, Δz – интервал между не сгруппированными данными [Л. 3].

Случайная величина (плотность распределения сопротивления контактных систем автоматического выключателя) распределяется по закону нормального распределения, т.е. соответствует условию:

$$F(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1),$$

где $F(z)$ – плотность распределения сопротивления; z – значения сопротивления контактов; m и σ – параметры распределения [Л 4]

Параметр $m = M_y$ представляет собой среднее значение величины z , оцениваемое по формуле:

$$M_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i, \quad (2)$$

параметр σ – среднее квадратическое отклонение величины z , оцениваемое по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - M_z)^2} \quad (3).$$

Таким образом, учитывая, что сопротивление контактных систем автоматических выключателей соответствуют закону нормального распределения, то оно рассматривается как случайная функция $R(x)$ количества коммутационных циклов x :

$$R(x) = R_0 + \int_0^x J dx \quad (4)$$

где R_0 – экспериментальное значение сопротивления контактных соединений; J – скорость изменения сопротивления контактов (интенсивность), рассматривается в функции основных параметров коммутации:

$$J = f(I_{fii}) = \frac{dR}{dx} \quad (5).$$

Для автоматических выключателей по результатам экспериментальных исследований [Л. 2] скорость изменения сопротивления будет находиться, как:

$$J = \frac{dR}{dx} = (-3,704 \cdot e^{-0,06I_{fii}} + 0,06)x \text{ при } I_{ном} < 60A;$$

$$J = \frac{dR}{dx} = (-0,0794 \cdot e^{-0,01I_{fii}} + 0,00175)x \text{ при } I_{ном} > 60A.$$

Функция $R(x)$ исходит из точки, называемой полюсом, ордината полюса принимается равной $R_{0,ср}$ и находится:

$$R_{f,\bar{r}\bar{o}} = \bar{R} + k\sigma_R, \text{ где } \bar{R} = \sum_{i=1}^n R_i / n - \text{среднее значение сопротивления}$$

ния; $\sigma_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 / (n-1)}$ - среднее квадратическое отклонение

малой выборки; k – зависит от количества испытаний образца, находится использованием таблицы функции распределения Стьюдента ($k = 1,43$ при $n = 5$).

Характеристика определения среднего значения сопротивления имеет вид: $R_{f,\bar{r}\bar{o}}(x) = R_{f,\bar{r}\bar{o}} + Jx$.

Экспериментальные данные [Л. 2] показывают, что скорость изменения сопротивления контактов увеличивается в процессе износа: $J = \alpha x^\beta + J_0$ (6), где α и β - постоянные, J_0 – начальная скорость изменения сопротивления.

В этом случае выражение для срока службы аппарата (5) будет иметь вид: $N = x[(1 \pm uv(1-y)) / y]^{1/\beta}$ (7), где $y = R/R_{доп}$ – относительный уровень сопротивления, $R_{доп} = 3R_0$; $v = \sigma/J$, σ^2 – дисперсия R ; u – ширина доверительного интервала, определяет вероятность доверительных границ интервала вероятностей $\Phi(u)$.

Выражение (7) показывает, что доверительный интервал для срока службы N в значительной степени зависит от достигнутого уровня относительного сопротивления y . Величины v и β подлежат определению опытным путем по результатам испытаний однотипных образцов.

Вывод

При изменении сопротивления контактных соединений автоматических выключателей в процессе эксплуатации по нелинейному закону зависимость срока службы может быть найдена по выражению

$$N = x \left[\frac{1 \pm uv(1-y)}{y} \right]^{1/\beta}.$$

Литература

1. **Кобленц М.Г.**, Стеценко А.А. Определение электрической износоустойчивости контактов контакторов. «Электротехника», 1970, №5.
2. **Шевченко В.В.**, Грачева Е.И. Определение сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов. // Промышленная энергетика. 2002, №1, с. 42-43.
3. **Атамалян Э.Г.** Приборы и методы измерения электрических величин : учеб. пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2005.
4. **Вентцель Е.С.**, Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Уч. пособие для ВУЗов. – М.: Высш. шк., 2000.

УДК 621.321

В.Г. ГОЛЬДШТЕЙН, д.т.н., профессор,
П.В. КОПЫРЮЛИН, аспирант
(СамГТУ), г. Самара

Анализ способов ограничения продольных токов в экранах однофазных кабелей трехфазной системы

При внедрении кабелей новой конструкции в существующие системы электроснабжения городов и отдельных потребителей, остро стоит проблема выбора сечения экранов и ограничения токов короткого замыкания (КЗ) в них в симметричных и в несимметричных режимах. Повышенные значения токов или напряжений в жилах вызывают соответствующие показатели режима в экранах различных фаз, что может привести к выгоранию экрана из-за меньшего его сечения по сравнению с сечением жилы кабеля. Поэтому развитие и рационализация способов ограничения токов в экранах является важнейшей задачей, стоящей перед инженером на этапах проектирования и реконструкции существующей сети.

Для решения этой задачи рассмотрены два способа прерывания продольных токов через экраны отдельных однофазных кабелей трехфазной системы.

1. Односторонние заземления экранов в конце каждой строительной длины кабеля в специальных изолирующих муфтах рис. 1, а.

2. Электромагнитная компенсация с применением транспозиции экранов, где сумма ЭДС, наводимых в оболочках трех секций транспозиции равна нулю вследствие сдвига ЭДС на 120° рис 1, б. При этом продольные токи в нормальном режиме в оболочках не протекают. Разумеется, при использовании этого способа, сумма ЭДС будет равна нулю в том случае, если фазы расположены симметрично. В противном случае несимметрия вызовет ток через оболочки кабелей, приводящий к дополнительному нагреву изоляции.

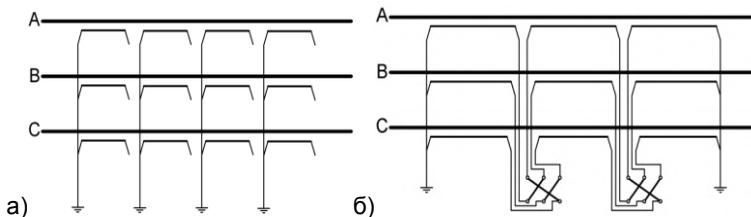


Рис. 1. Схема соединения экранов групп из трех однофазных кабелей в случае, а) когда экран разделен на секции заземленные один раз; б) когда применен N=1 цикл транспозиции.

Однако оба способа нарушения целостности электромагнитного экрана кабелей будут вызывать вытеснение поля в пространство с наружной стороны оболочек и, следовательно, ряд нежелательных явлений, которые будут затруднять эксплуатацию кабельной линии. К этим нежелательным явлениям относятся:

- а) наведенные потенциалы частоты 50 Гц на экранах кабелей, возникающие как в рабочих режимах, так и при аварийных (возникновениях КЗ);
- б) дополнительные потери в подземных и наземных металлических коммуникациях, находящихся вблизи КЛ, от вихревых токов и подсушкой почвы этими токами;
- в) импульсные воздействия на изоляцию оболочек кабелей при набегании грозовых импульсов и крутых импульсов коммутационных перенапряжений.

С помощью расчетных выражений для токов в экранах фаз кабеля, были вычислены соотношения $I_э / I_ж$, то есть величина тока в экране $I_э$ по сравнению с током в жиле $I_ж$. Обобщение результатов расчетов в зависимости от сечения жилы $S_ж$ и экрана $S_э$ приведены на рис. 2. В случае частичного разземления экранов или их транспозиции ток в экране в симметричном режиме заметно снижается и определяется уже не взаимными сопротивлениями Z , а напряжением жилы относительно земли и емкостью «жила-экран» рис. 3.

При этом приняты «типовые» расстояние между фазами кабеля, к которому относится $d = 0,1$. Здесь отметим, что данные рис. 2 получены в расчете на $L_к=1$ км длины кабеля и на $I_ж=1000$ А через его жилу.

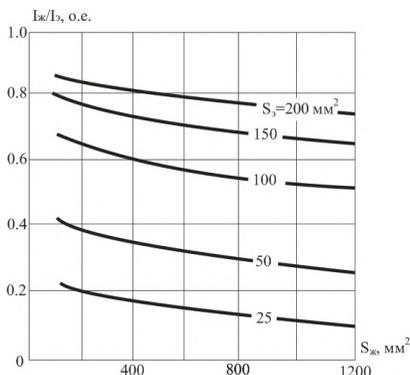


Рис. 2. Ток в экране однофазного кабеля 6-10 кВ в сравнении с током в жиле в зависимости от сечения жилы $S_{ж}$ и экрана $S_{э}$.

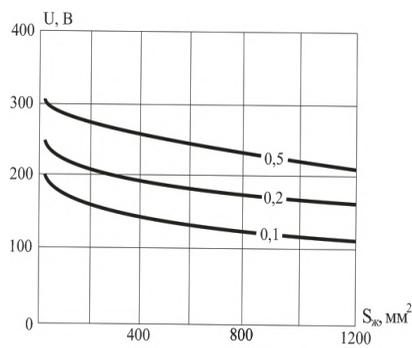


Рис. 3. Напряжение на экране однофазного кабеля 6-10 кВ в зависимости от сечения жилы $S_{ж}$ и расстояния d между кабелями соседних фаз расположенными в ряд. Напряжение дано на длину кабеля 1000 м и ток в жиле 1000 А.

Для кабелей 6-35 кВ при расчетном трехфазном коротком замыкании наводимое на экран напряжение в случае применения N полных циклов транспозиции составит: $U_э = \frac{U}{3N} \cdot \frac{L_к}{1000} \cdot \frac{I_ж}{1000}$, а в случае деления экрана на K секций (экран надо разрезать $K-1$ раз):

$$U_э = \frac{U}{K} \cdot \frac{L_к}{1000} \cdot \frac{I_ж}{1000},$$

Вывод

Анализ способов ограничения токов в экранах КЛ 6-35 кВ позволяет констатировать, одинаковую эффективность применения транспозиции ($3 \cdot N$ секций экранов) и простого деления экрана на $K=3 \cdot N$ однократно заземленных секций. Применение транспозиционных коробок, соединяющих соседние секции между собой, в сетях 6-35 кВ не требуется.

Литература

1. Проспекты и инструкции фирмы Nexans: «Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-35 кВ и их применение». 2005.
2. "Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Шестое издание" (утв. Главтехуправлением, Госэнергонадзором Минэнерго СССР 05.10.1979) (ред. от 20.06.2003) п. 7.3.102.
3. ООО «НПК «Сим-Росс». Кабели с изоляцией из ЭПР: 10 лет применения в России // «КАБЕЛЬ-news». 2012. №5. С. 40-41.

СЕКЦИЯ «ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ: ЧЕЛОВЕК, ТЕХНИКА, ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

УДК 631.8:502

М.А. АНДРЕЕВА, студентка,
И.Г. МЕЛЬЦАЕВ, д. с.-х. н., проф.
(ИГЭУ), г. Иваново

Удобрения – причина загрязнения окружающей среды

К минеральным удобрениям относятся неорганические химические соединения, применяемые в сельском хозяйстве в целях повышения плодородия почв. Различают макро- и микроудобрения. Минеральные макроудобрения - вещества, в состав которых входят основные биогенные элементы, повышающие плодородие (азот, фосфор, калий). Соответственно макроудобрения делятся на азотные, фосфатные, калийные и комплексные. Современная технология применения минеральных удобрений предотвращает их максимальное накопление фитомассой сельскохозяйственных растений. Значительная часть удобрений вымывается в подземные воды, мигрирует с поверхностным стоком, разлагается в почве, образуя летучие продукты, поступающие в приземный слой атмосферного воздуха. Сегодня в научной литературе имеется достаточно убедительных данных о том, что при нерациональном использовании минеральных удобрений возникает реальная опасность для здоровья человека и окружающей среды обитания. Наибольшее внимание уделяют азотным удобрениям. Компоненты азотных удобрений (аммиак, нитраты, мочевины) при чрезмерном внесении в почву могут мигрировать в поверхностные и подземные водоемы, загрязняя их. Наиболее вероятно поступление нитратных соединений (подвижной формы азотных удобрений) в грунтовую воду. При загрязнении воды источников водоснабжения нитратами в концентрациях, превышающих 45 мг/л, у новорожденных, которые находятся на искусственном вскармливании и людей пожилого возраста может возникнуть водно-нитратная метгемоглобинемия. Нитраты, которые являются компонентами нитратных (натриевая, калиевая и калиевая селитры) и аммонийно-нитратных (аммиачная селитра) удобрений, а также образовавшиеся в почве из аммиака аммиачные (аммиачная вода), аммония аммонийных (сульфат аммония) и мочевины амидных азотных удобрений, являются предшественниками синтеза в объектах окружающей среды нитрозосоединений, большинство из которых обладают мутагенными и канцерогенными свойствами. В почве постоянно присутствуют продукты разложения белковых веществ - амины и амиды, а также, при условии чрезмерного использования азотных удобрений, - нитраты и нитриты, из которых во время трансформации в почве

могут образоваться нитрозоамины и нитрозоамиды (N-нитрозодиметиламин, N-нитрозодиэтиламин и др.). Нитрозосоединения могут синтезироваться в фитомассе сельскохозяйственных растений при условии поступления в них избыточного количества нитратного азота. Нитрозосоединения относительно стабильны в объектах окружающей среды, мало растворимы в воде и большинство из них высоколетучи. По экспертным оценкам, в организм человека с питьевой водой, продуктами питания, атмосферным воздухом может поступить до 5-10 мкг нитрозоаминов в сутки. Нитрозосоединения нитрозоамины и нитрозоамиды могут образовываться в организме человека в результате эндогенного синтеза, достигая 7 мг/сут. Большинство нитрозоаминов и нитрозоамидов являются сильными химическими канцерогенами. Некоторые нитрозосоединения (N-нитрозометилмочевина,

N-нитрозоэтилмочевина) проникают через трансплацентарный барьер в организм плода, оказывая эмбриотоксическое и тератогенное действие. Поглощенные почвой фосфаты малоподвижны и лишь 2% их вымывается из пахотного слоя. Поэтому при чрезмерном применении фосфатных удобрений в почве накапливается P_2O_5 в таком количестве, которое способно тормозить процессы ее самоочистки. Кроме того, фосфаты с поверхностным стоком могут попадать в открытые водоемы и вызывать их эвтрофикацию. Гигиеническое значение имеет тот факт, что фосфатные удобрения содержат примеси фторсодержащих соединений (от 0,2 до 4%), железа, стронция, селена, мышьяка (не менее 0,006%), тяжелых металлов (не менее 0,008%), в том числе кадмия (10-30 мг/кг), радионуклидов (урана, тория). Поэтому при несоблюдении гигиенических норм их применения они загрязняют почву, растения, воду подземных и поверхностных водоемов. Так, с фосфатными удобрениями в почву поступает фтор в количестве 8-20 кг/га; до 0,4% мигрирует в растения, 25% вымывается в открытые водоемы, а остальное количество накапливается в почве и мигрирует в подземные воды, иногда способствуя увеличению уровня фтора в грунтовых водах до 20 мг/л. Установлено, что при внесении в почву суперфосфата уровень кадмия в картофеле увеличивается в 4 раза по сравнению с контролем [1].

Калий, входящий в состав калийных удобрений, мигрирует из почвы в контактирующие среды чрезвычайно медленно, не оказывая негативного воздействия на почвенный биоценоз и способность почвы к самоочистке. Вместе с калийными удобрениями в почву поступают хлориды анионы. Если вносят 45-50 кг/га калийных удобрений (в пересчете на K_2O), то вместе с ними поступает 30-35 кг/га хлорида аниона, что приводит к искусственному засолению почв. Накопление значительных количеств калия в почве может вызвать нарушение соотношения между калием и натрием в питьевой воде, пищевых продуктах и отрицательно повлиять на здоровье человека - вызвать нарушение деятельности сердечно-сосудистой системы.

Микроудобрения вносят в почву в относительно небольших количествах. В их состав входят разнообразные микроэлементы, содержащие тяжелые металлы, тем самым существует реальная угроза загрязнения почвы ими. При превышении норм расхода микроудобрений микроэлементы могут накапливаться в почве и растениях в избыточных количествах, оказывая отрицательное влияние на здоровье людей. В состав микроудобрений входит довольно много свинца, а иногда кадмия и мышьяка.

Большинство, выпускаемые химической промышленностью, минеральные удобрения характеризуются физиологической кислотностью. Их применение в высоких дозах вызывает подкисление почвенного раствора, а это приводит к уменьшению поглощения оснований, к усилению минерализационных процессов, нарушению соотношения подвижного фосфора макро- и микроэлементов в почве и соответственно элементного состава. Вследствие подкисления почвенного раствора, происходит высвобождение ионов алюминия, которые весьма токсичны для растений и почвенной биоты.

На начальных стадиях поступления тяжёлых металлов почва способна при помощи гумусовых соединений, кислотности и своих адсорбционных свойств поддерживать уровень содержания их в почвенном растворе, не приводящей к накоплению в растениях. При накоплении в большом количестве тяжелых металлов в почве, происходит нарастание их и в растительной продукции. В какой степени опасно загрязнение почв тяжёлыми металлами в результате применения минерального удобрения имеются различные высказывания. Так, длительное использование разных видов искусственных туков в агроэкосистемах оказывает глубокое воздействие на химические, физико-химические и биологические свойства почвы. Биофильные микроэлементы типа Mn, Fe, Cu, Mo, Co и Zn и другие при больших концентрациях в окружающей среде переходят в разряд загрязнителей. Существенный недостаток большинства минерального удобрения, физиологическая кислотность и наличие в них остаточных кислот. Интенсивное применение таких минеральных удобрений приводит к подкислению почв и тем самым ухудшению свойств почвы. При этом заметно увеличивается подвижность радионуклидов и тяжелых металлов [2].

Известно, что экологическая безопасность является составной частью национальной безопасности регионом и в целом Российской Федерации, она связана с антропогенным воздействием на природную среду. Основными причинами неудовлетворительного отношения к природной среде является низкий уровень экологической культуры людей, а также слабая нормативная и законодательная база в формировании экологической безопасности.

Литература

1. Черников, В.А. Агроэкология / В.А. Черников [и др.].– М.: Колос, 2004. 400 с.
2. Аристархов, А.И. Состояние и методология прогноза загрязнения почв тяжёлыми металлами /А.И. Аристархов, А.Ф. Харитоновна //Плодородие, 2002.– № 3, 6.

Развитие методики диагностики и оценки состояния трансформаторов по анализу растворённых газов в масле

Силовые трансформаторы являются сложным и дорогостоящим оборудованием, от его безаварийной работы в конечном итоге зависит надёжность функционирования всего электросетевого комплекса.

В современных условиях повышение надёжности силовых трансформаторов неразрывно связано с совершенствованием систем диагностики и оценки состояния оборудования, которое определяется в основном состоянием изоляции.

Среди множества диагностических параметров (вибрация, температура, спектр электромагнитного излучения и т.д.), необходимо особо выделить концентрации растворённых газов в масле трансформатора.

Масло силового трансформатора, является важной информационной средой. Так в масле нормально работающего трансформатора растворены газы, выделяющиеся из целлюлозной изоляции и масла в результате естественного старения. К таким газам можно отнести двуокись и окись углерода, иногда метан, а также кислород и азот. В случае же возникновения дефекта состав газа растворённого в масле будет изменяться как качественно, так и количественно [1].

Поэтому одним из эффективных способов оценки состояния изоляции силовых трансформаторов является газовая хроматография, позволяющая определять концентрации растворённых газов в масле. В настоящее время измеряют концентрации следующих семи газов: водород (H_2), метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), этилен (C_2H_4), этан (C_2H_6), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2). К достоинствам данного метода можно отнести высокую информативность, низкую стоимость и возможность проведения анализа на действующем оборудовании.

С помощью хроматографического анализа выявляют две группы дефектов: перегрев токоведущих и конструктивных элементов электрооборудования, наличие электрических разрядов в изоляции [2].

Однако интерпретация полученных результатов не является тривиальной задачей, что подтверждается наличием множества конкурирующих методик анализа полученных результатов: официально действующая в РФ методика на основе [2], методика компании АО «КЕГОС», методика НИЦ «ЗТЗ-Сервис», методика IEEE, методика Роджерса, треугольник Дюваля, метод ETRA, методика «Лепестковая диаграмма» и др [1]. При этом не исключены ситуации, когда заключения разных методик прямо противоречат друг другу.

Одним из способов разрешения данной ситуации является применение такой статистической обработки данных, которая бы оперировала по возможности большим количеством диагностических факторов. В данном случае, подразумевается использование концентраций всех семи газов. Такой подход предполагает уменьшение неопределённости в конечном результате и, следовательно, общее повышение надёжности метода.

Представляется перспективным вести развитие методики диагностики и оценки состояния силовых трансформаторов на основе математического аппарата кластерного анализа.

Идея разрабатываемого метода состоит в том, чтобы с помощью кластерного анализа на основе накопленных ранее данных хроматографического анализа и соответствующего ему физического состояния трансформаторов сформировать для однотипного оборудования кластеры подобных состояний. К таким состояниям можно отнести: исправное состояние, наличие электрических, тепловых дефектов большой вероятности, а также кластеры, соответствующие наличию развивающихся, зарождающихся дефектов.

При этом принадлежность к тому или иному кластеру должна определяться исходя из всей совокупности концентраций (и/или её изменений) газов, регистрируемых в ходе проведения хроматографического анализа.

В дальнейшем, при обработке вновь поступающих данных тем же алгоритмом, по принадлежности диагностируемого трансформатора к конкретному кластеру можно судить о его физическом состоянии: наличие электрического, теплового дефекта, наличие развивающегося дефекта и т.д.

Литература

1. **Попов Г.В.** Вопросы диагностики силовых трансформаторов/ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С. 176.
2. **РД 153-34.0-46.302-00.** Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в трансформаторном масле. – М., 2001.

УДК 005.51, 621.314

Д.А. ВОРОШИН, программист,
(ИГЭУ, г. Иваново)

Преимущества веб-интерфейса для автоматизированных систем в энергетике

Предприятия энергетического комплекса являются, в большинстве случаев, территориально распределёнными организациями. Объекты обслуживания (подстанции, кабельные линии) находятся на значительном удалении друг от друга. С другой стороны для стабильной работы энергосистемы необходима полная информация о состоянии всего экс-

платируемого оборудования. Для этого применяются системы паспортизации, мониторинга и диагностики. При этом серьёзной проблемой при внедрении таких систем является необходимость централизованного хранения и управления информацией. Существует ряд решений, позволяющих, с одной стороны, обеспечить единое хранение всех данных о энергосистеме, включая информацию о состоянии оборудования и мониторинг, с другой стороны обеспечить равноправный доступ всем заинтересованным лицам и системам в независимости от их физического местонахождения. Для этих целей обычно применяются:

- репликация – копирование информации на устройства синхронно асинхронно, в автоматическом или ручном режиме;
- терминальный доступ, когда необходимые программы устанавливаются на сервере терминалов, а доступ к ним обеспечивается посредством удалённого подключения;
- клиент-серверный доступ к единому серверу, доступному через интернет;
- трехзвенная архитектура, позволяющая разгрузить канал передачи данных путём перенесения части бизнес логики на централизованный сервер приложений;
- веб-интерфейс, когда доступ к информационной системе осуществляется через стандартный браузер в стандарте HTML.

На сегодняшний день наиболее перспективным подходом представляется использование веб-интерфейса как единого подхода к построению информационных систем в энергетике. Такой подход имеет ряд ключевых преимуществ, позволяющих обеспечить высокую надёжность функционирования системы и высокую доступность информации. Основные из них: низкая нагрузка на клиентскую сторону, поддержка большинством устройств, включая мобильные и планшетные, способность работать через медленные каналы связи, интуитивная понятность. Веб-интерфейс реализован в автоматизированной системе оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» 7. В настоящее время система проходит опытную эксплуатацию в «МРСК» Урала.

УДК 658.382

А.Г. ГОРБУНОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ)

Метод количественной оценки риска техногенных аварий

В основе существующих в настоящее время методик оценки риска техногенных аварий на опасных производственных объектах [1÷3 и т.д.] лежит расчет вероятности реализации различных сценариев развития аварийной ситуации. Необходимым условием успешного реше-

ния этой задачи является построение правдоподобных сценариев развития аварий и определение достоверных значений вероятности реализации различных событий в рамках рассматриваемых сценариев. Однако последнее обстоятельство сопряжено с определенными трудностями, поскольку указанные вероятности можно определить только на основе анализа имеющейся статистики отказов и аварий, достоверность которой вызывает обоснованные сомнения.

В докладе предлагается иной подход к решению этой задачи. В основе его лежит прогноз на следующий расчетный период, составляемый на основе анализа реальной текущей ситуации на данном производственном объекте за предыдущий период. Эта ситуация характеризуется некоторым набором условных параметров:

- долей исправных конструктивных элементов оборудования обеспечивающих его безопасность в общем количестве таких элементов;

- долей исправных инструментов и приспособлений, которыми пользуются работники данного опасного производственного объекта в общем количестве таких инструментов и приспособлений, и т.д.

Литература

1. **Гражданкин А.И.** Оценка техногенного риска: техническое регулирование, стандартизация, критерии приемлемости / Безопасность труда в промышленности. – 2004. - №7. – с.48-49.
2. **Лисанов М.В.** О техническом регулировании и критериях приемлемого риска / Безопасность труда в промышленности. – 2004. - №5. – с.11-14.
3. **СТО РД Газпром30-1.10-084-2003.** Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».

УДК 629.13

А.А. ГУСЕЙНОВА, студентка,
И.Г. МЕЛЬЦАЕВ, д. с.-х. н., профессор,
(ИГЭУ, г. Иваново)

Автотранспорт – источник опасности для человека

Одним из основных компонентов производительных сил современного общества является мобильная техника - совокупность средств труда, развивающихся в системе общественного производства, а также как прием и метод воздействия на природную среду в процессе этого производства материальных благ. Использование не вполне экологичной техники приводит к загрязнению окружающей природной среды, что связано с использованием органического топлива. Выбросы отработанных газов автотранспортом в количественном отношении сравнимы с выбросами крупных промышленных предприятий. Отсюда следует, что автотранспорт на сего-

дня считается серьезным загрязнителем окружающей среды. С выхлопными газами в атмосферу выбрасывается около 200 вредных веществ и соединений разной степени вредности в том числе - бенз(а)пирен, диоксины, альдегиды, которые считаются супертоксиантами. Диоксины легко проникают в ядро клетки живых организмов, вызывая, с одной стороны, ускоренное разрушение гормонов, витаминов, лекарств и т.д., а с другой стороны – активизацию канцерогенов, нейротоксичных ядов и даже превращение многих безвредных веществ в чрезвычайно токсичные. Бензапирен считается сильнейшим канцерогеном, его содержание ПДК в атмосферном воздухе не должно быть более 10^{-6} мг/м³. При нормальных условиях это соединение представляет собой кристаллы желтого цвета, плохо растворимые в воде и хорошо растворимые в органических растворителях. В сыворотке крови человека растворимость бензапирена достигает до 50 мг/мл. Попадая в организм человека, он постепенно накапливается до критических концентраций и стимулирует образование злокачественных опухолей. Загрязнение среды обитания, связанное с выхлопами автотранспорта распределяется по всей территории страны, в отличие от выбросов промышленного производства, которые в большинстве своем локальны.

В городах с миллионным населением доля загрязнения атмосферного воздуха выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания колеблется в пределах 80–90 %, а в среднем по стране до 50% от общего объема выбрасываемых газов. И эти выбросы ежегодно увеличиваются вследствие пополнения автопарка (автопарк России насчитывает сегодня 50,5 млн ед.). С этими выхлопными газами в атмосферный воздух попадают также 65,8 % окислов углерода, 20% – окислов азота, 30 % – серы, 10,6 – углеводов и сажи – 0,4 % от общего объема их выбросов. Следует отметить, что к 2012 г. объем выбросов вредных веществ автотранспортом по сравнению с 2008 г. увеличилось на 45,0 %. Автотранспорт считается чрезмерно опасным техническим средством, при не умелом управлении им. В результате ДТП на дорогах РФ ежегодно погибает десятки тысяч человек, сотни тысяч получают травмы различной степени тяжести. Так, с 1980 г. по 2012 г на дорогах России произошло 5123363 ДТП, при этом погибло 881561 человек, а травмы получили – 6093605 человек [1]. Если эти потери перевести на военную терминологию: ежегодно на дорогах РФ погибает людей больше полноценной дивизии и это в мирное время. Значит – наши дороги это место локальных боевых действий. Это хорошо проиллюстрировано по годам в табл. 1.

За 7 месяцев (январь-июль) 2008 года в России произошло 105376 дорожно-транспортных происшествий, в результате которых погибли 13058 человек, а 133561 человек получили ранения различной тяжести. Из них 6166 ДТП произошло по вине водителей, находившихся за рулем в состоянии опьянения, в результате этих ДТП погибли 982 человека, а 9170 человек получили ранения.

Таблица 1. Дорожно-транспортные происшествия на дорогах РФ

Год	Кол-во ДТП	Погибло	Ранено
1980	168 657	27 500	138 100
1985	139 035	22 676	148 645
1986	138 637	20 651	150 356
1987	142 695	21 243	155 684
1988	161 320	25 938	176 583
1989	189 986	32 739	207 628
1990	197 362	35 366	214 820
1991	197 659	37 510	214 409
1992	184 975	36 471	200 026
1993	178 651	37 120	192 802
1994	174 908	35 599	189 877
1995	167 280	32 791	183 926
1996	160 523	29 468	178 378
1997	156 515	27 665	177 924
1998	160 300	29 021	183 846
1999	159 823	29 718	182 123
2000	157 495	29 594	179 401
2001	164 401	30 916	187 790
2002	184 360	33 243	215 678
2003	204 267	35 602	243 919
2004	208 558	34 506	251 386
2005	223 342	33 957	274 864
2006	229 140	32 724	285 362
2007	233 809	33 308	292 206
2008	218 322	29 936	270 883
2009	203 603	26 084	257 034
2010	199 431	26 567	250 635
2011	199 868	27 953	251 849
2012	203 597	27 991	258 617
Всего	5 123 363	881 561	6 093 605

За указанный период произошло 11010 ДТП с участием детей, в которых 481 ребенок погиб, а 11462 ребенка получили разного рода ранения. При рассмотрении структуры ДТП в РФ видно, что за 2009 год произошло 203603 в результате которых погибли 26084 человека, а 257034 человека получили ранения. Из этого общего количества ДТП 12326 сделано по вине водителей, находившихся за рулем в состоянии опьянения, в результате этих ДТП 2217 человек погибли, а 18206 человек получили ранения. За прошедший год произошло 19 970 ДТП с участием детей, в которых 846 детей погибли, а 20869 детей получили ранения. В 2010 году в России произошло 199 431 ДТП. В них погибло 26 567 человек, а 250635 человек получили ранения различной тяжести. Из общего количества ДТП 11845 оказались по вине водителей, нахо-

дившихся за рулем в состоянии алкогольного или наркотического опьянения. В результате этих ДТП 1954 человека погибли, а 17280 человек получили ранения. 20262 ДТП произошло с участием детей, в которых 898 детей погибли, а 21149 получили ранения разной тяжести. В январе 2013 г на дорогах России произошло 11856 дорожно-транспортных происшествий, где погибло 1554 и ранено 15700 чел. Примерно такое же положение при рассмотрении дорожно-транспортных происшествий за 2010 год мы видим, что в Ивановской и в смежных областях: Костромской, Владимирской и Ярославской. Владимирской области в этом году произошло 3339 ДТП, в них погибло 535 человек и получили ранение 4432 человека, Ярославской соответственно погибли 254 и получили ранение 2632 человека. Как показывают данные таблицы меньше аварий с участием автотранспорта было в Костромской области, за ним следует Ивановская. Это связано не культурой вождения водителей, а меньшим количеством автотранспорта в последних областях (табл. 2)

Таблица 2. Дорожно-транспортные происшествия с особо тяжкими последствиями на дорогах смежных областей Ивановской области

Область	ДТП	Погибло	Ранено
Дорожно-транспортные происшествия за 2010 г.			
Ивановская	1970	169	2521
Владимирская	3339	535	4432
Костромская	1097	95	1378
Ярославская	2147	254	2632
По центральному округу	55532	7021	69613

Литература

1. Электронный источник: ru.wikipedia.org/wiki/ДТП.

УДК 502.3

Е.Л. ЗАКУРИНА, студентка;
В.П. СТРОЕВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Особенности трудовой деятельности на ТЭЦ

Ведущими неблагоприятными физическими факторами для работника котельной на ТЭЦ являются неионизирующие электромагнитные поля и излучения, шум, вибрация, освещенность. Находящиеся под напряжением кабельные сети, постоянно работающее электротехническое оборудование создают высокие уровни напряженности электрического поля.

Работа агрегатов сопровождается постоянным высоко- и низкочастотным шумом.

Уровни шума оценивались по ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум, общие требования безопасности» и СН 2.24/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий на территории жилой застройки».

Характеристика уровня шумового воздействия на машиниста обходчика котлов свидетельствует, что на рабочих местах котельном цехе уровень шума превышает допустимую величину (65 дБА) на 5 дБА в среднем.

Поэтому рекомендуется провести мероприятия по снижению уровня шума.

Расчет звукоизоляции ограждающих конструкций должен проводиться при разработке новых конструктивных решений ограждений, применении новых строительных материалов и изделий. Окончательная оценка звукоизоляции таких конструкций должна проводиться на основании натуральных испытаний по ГОСТ 27296.

Звукопоглощающие облицовки, как правило, размещают на потолке и верхних частях стен помещения; рекомендуется облицовывать не менее 60% общей площади.

Такое мероприятие снижает уровни шума в зоне отраженного звука на 4-8 дБ на низких и на 10-12 дБ в области средних и высоких частот, а на рабочих местах в зоне прямого звука до 4-5 дБ.

В вентиляционных установках основными источниками шумового воздействия на окружающую среду являются шум от работы агрегата и аэродинамический шум, создаваемый при движении воздушного потока.

Шум вентиляционной установки, распространяясь по воздуховодам, проникает через приточные или вытяжные решетки в помещения или окружающую атмосферу и может создавать там уровни шума, превышающие допустимые по нормативам.

Для снижения шума вентиляционных установок применяют глушители в виде камер, облицованных звукопоглощающим материалом. Трубчатые глушители представляют собой полностью облицованные каналы круглого или квадратного сечения. Они наиболее просты в изготовлении.

Пластинчатые глушители представляют собой набор параллельно и равномерно расположенные в канале звукопоглощающие пластины, облицованные звукопоглощающим материалом.

Глушители шума с пространственными звукопоглотителями представляют собой вертикально или горизонтально установленные металлические каналы, в которых расположены звукопоглощающие тела. Это наиболее сложные в изготовлении глушители.

Эффективным средством защиты являются противошумные наушники. Имеются наушники противошумные телефонизированные, которые используются для защиты от производственного шума и одновременно организации связи.

Звукоизолирующая способность противошумных наушников составляет от 15 дБ на низких частотах до 40 дБ на высоких.

Может быть рекомендована противошумная каска, которая представляет собой комбинацию защитной каски и противошумных наушников.

Средства индивидуальной защиты от шума следует выбирать в зависимости от частотного спектра шума на данном рабочем месте и показателей по снижению шума.

Литература

1. Григорьев В.И. «Тепловые и атомные электрические станции». - М.: Энергоиздат, 1982.-624 с.
2. ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум, общие требования безопасности».
3. СНиП 23-03-2003. Защита от шума.
4. СН 2.24/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий на территории жилой застройки».

УДК. 677. 024

С.Ю. КАПУСТИН к.т.н.,доцент
(ИГТА) г. Иваново

Исследование технологических и воздушно-пылевых потоков образующихся при переработке льноволокна при помощи методов оптической визуализации

Представленная разработка основывается на методах оптической визуализации. При использовании методов оптической визуализации результаты получаются без ввода в исследуемую область каких-либо возмущений. Применение метода оптической визуализации в приложении к изучению технологии и аэродинамики текстильных машин дает возможность изучить динамику распространения и развитие технологических и воздушных потоков, а также движение в них пыли, сорных примесей и волокон[1,2,3]. На основе экспериментального материала можно изучить физическую сущность происходящих процессов, установить оптимальную форму аэродинамических ограждений и других деталей машин, проконтролировать установку новых пылеприемников и оптимально установить существующие. Причем все исследования могут проводиться в условиях промышленного производства и требуют относительно простой аппаратуры.

Используем два метода оптической визуализации:

1.Прямой теневой метод (метод светящейся точки). Фиксирующий линейное смещение луча. 2.Теневой метод (шпирен-метод) связанный с диафрагмированием световых лучей, действие которых основано на использовании углового отклонения, прошедших сквозь исследуемую среду лучей.Использование двух теневых методов требует относительно простой аппаратуры и часто дает очень ценную для понимания исследуемых явлений информацию. Основные достоинства теневых методов они обладают высокой чувствительностью, не оказывает никакого воздействия на исследуемую среду, практически бе-

знергонные и позволяют проводить исследования в пределах достаточно больших участков с высокой точностью. Для исследования движения волокон, сорных примесей и пыли использовали лазерный теневой метод. В основе его лежит использование газового гелий-неонового лазера. Специфические свойства лазерного излучения высокая монохроматичность, когерентность и направленность лазерного пучка, значительно расширили возможность теневого метода, только при помощи его можно наблюдать определенные процессы. При помощи разработанных методов зафиксированы основные воздушно-пылевые потоки образующиеся при работе поточной линии для переработке льноволокна. По мере движения льноволокна на главном барабанелентоформирующей машины образуется воздушно-пылевой поток 1 (рис.1), который вылетает в рабочую зону. Существующее аспирационное устройство в виде зонта 2 не успевает его удалять из большой скорости воздушно-пылевого потока.

Далее представлен анализ полученных фотографий полученных при помощи разработанных методов. На (рис.2) представлено образование вихревого потока 1, вихри образующиеся при движении главного барабана лентоформирующей машины, возникают вследствие не рациональной установке ограждений не учитывающих взаимодействие воздушных и технологических потоков.

На основании вышеприведенных исследований разработан комплекс устройств (рис.3,4) позволяющих эффективно удалять образующиеся воздушно-пылевые потоки на поточной линии. Динамика движения сорной примесивыделяющейся из эллипсовидного отверстия поддона установленного на лентоформирующую машинупредставлена на (рис.5),получена при помощилазерного теневого метода.

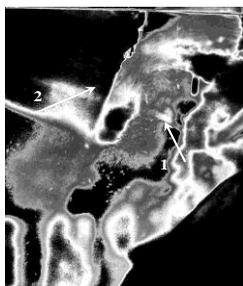


Рис.1. Воздушно-пылевой поток возникающий при вращении главного барабана и вылетающий в рабочую зону: 1-воздушно-пылевой поток; 2- аспирационное устройство (зонт)

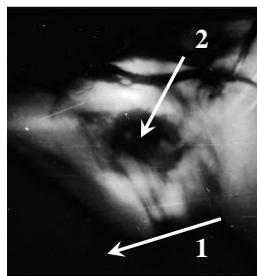


Рис.2. Зафиксирован вихревой поток возникающий на лентоформирующей машине, 1-главный барабан, 2- образующийся вихрь

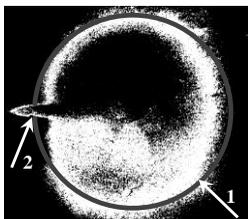


Рис.3. Показано всасывание воздушно-пылевого потока пылеприемником установленным у гребня питателя 1-корпус пылеприемника; 2-щель пылеприемника

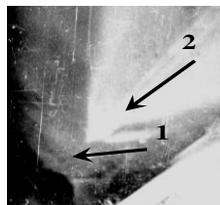


Рис.4. Воздушно-пылевой поток удаляется при помощи установленного аспирационного устройства (зонта): 1-воздушно-пылевой поток ;2- установленный зонт

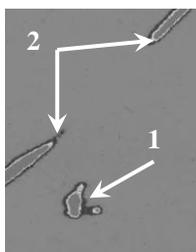


Рис.5. Выделение сорных примесей из эллипсовидного отверстия поддона установленного под главным барабаном лентоформирующей машины:1-сорные примеси; 2-кромки эллипсовидного отверстия

Разработанные методы дают возможность быстро и эффективно исследовать технологические и воздушно-пылевые потоки возникающие на текстильных машинах.

Литература

- 1.Капустин, С.Ю. Теоретическое исследование технологического движения льноволокна [Текст]/ С.Ю. Капустин, В.Д. Фролов , Ф.Р. Кахраманов// Изв. вузов. Технол. текст.пром-сти.-2007.-№5.-С. 45-48.
2. Капустин, С.Ю. Теоретическое определение действия аэродинамических сил на жгут волокна [Текст]/ С.Ю. Капустин, В.Д. Фролов , Ф.Р. Кахраманов// Изв. вузов. Технол. текст.пром-сти.-2007.-№4.-С. 54-58.
3. Капустин С.Ю.Теоретическое исследование вихревых воздушных потоков, возникающих на колосниковой решетке в зоне очистки льноволокна[Текст]/ С.Ю. Капустин, В.Д. Фролов , Ф.Р. Кахраманов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.– 2009.- № 3.- С. 67-71.

Среда обитания и состояние здоровья человека

Внутри любого организма существует среда, которая создается кровью, лимфой и другими физиологическими растворами. Очевидно, что жизнедеятельность организма, его взаимоотношения с внешней средой неразрывно связаны и с внутренним его состоянием. Важнейшие явления, которые происходят во внутренней среде организма, независимо от его сложности, определяются рядом функций. Например, желудочно-кишечный тракт выполняет две важные функции: пищеварение и последующее питание всех клеток тела, и выделение значительного большого числа ненужных для организма веществ, нежели почки. Токсины выводятся в основном только через кишечник. Они преимущественно выделяются в самой верхней части кишечника и при медленном движении пищевых масс большая часть их вновь всасывается в кровь, вредно сказываясь на состоянии организма.

Атмосферный путь поступления токсичных веществ в организм человека является ведущим, так как в течение суток он пропускает через легкие почти 15 кг воздуха, а через ЖКТ проходит только 2,5 кг воды и 1,5 кг пищи. Кроме того, при ингаляции химические вещества поглощаются организмом более интенсивно. Так, свинец, поступающий с воздухом, адсорбируется кровью примерно на 60 %, тогда как поступающий с водой всего лишь – на 10, пищей – на 5 %. Медиками установлено, что загрязнением атмосферы вызвано до 30 % общих заболеваний населения промышленных центров. При этом автомобильный транспорт является причиной 10-25 % заболеваний. На протяжении всей своей жизни человек стремится не столько приспособиться к природной среде, сколько сделать её удобной для своего существования. Люди осознали, что подчиняя природу, они опасно изменяют условия обитания всех живых существ, включая самих себя. Химические, физические, биологические и другие загрязнения оказывают вредное воздействие, прежде всего, на организм человека. Следует отметить, что современная экологическая ситуация оказалась одной из главных факторов ухудшения показателей здоровья населения РФ и снижения средней продолжительности жизни. Которая по РФ в 2012 году составила 68,2 года: мужчин около 60, лет, женщин — 76,0 (в Германии у мужчин 77 лет и 82 года у женщин) и увеличения смертности от убийств (33 тыс.) и самоубийств (55 тыс.), от случайных отравлений алкоголем 7,9 тыс. От болезней системы кровообращения 67,3 тыс. от случайных, органов дыхания 12,0 тыс., пищеварения 4,4 тыс.. от некоторых инфекционных и паразитарных болезней 3,3 тыс., от туберкулеза 3,7 тыс., от новообразований 1,7 тыс. Продолжи-

тельность жизни РФ меньше чем в США на 12 лет, на 11,5 лет, чем в странах Евросоюза и на 5 лет, чем в Китае. В мировой статистике из 192 стран – членов ООН Россия занимает по продолжительности жизни среди мужчин – 136 место, а женщин – 91.

По экспертным оценкам современная экологическая ситуация в РФ на 50 % определяется не только загрязнением, вызванными милитаризацией экономики, химизацией сельского хозяйства, экстенсивным использованием природных ресурсов, авариями и катастрофами, но и глобальными изменениями природной среды под воздействием хозяйственной деятельности на всей территории. Только лишь от загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами ежегодная смертность составляет 300-350 тыс. чел. Заболеваемость и смертность жителей сильно загрязненных промышленных в 1,5–3,0 раза выше, чем в среднем по стране. В больших городах загрязнение атмосферы автотранспортом является причиной почти половины случаев респираторных заболеваний. За последнее десятилетие на загрязненных территориях устойчиво растет количество больных хроническим бронхитом (увеличилось 1,8 раза), бронхиальной астмой. Загрязнение атмосферы в городах вызывает свыше 40 % всех причин общей заболеваемости. Установлена коррелятивная зависимость между загрязнением атмосферного воздуха свинцом, бензапиреном, оксидами азота и углерода с онкологической заболеваемостью, частотой врожденных аномалий, болезнями нервной системы. Существует взаимозависимость между концентрацией хлорорганических соединений в питьевой воде и смертностью от онкологических заболеваний, частотой спонтанных абортс у женщин. Хлор способствует образованию в воде высокотоксичных диоксинов и тригалометанов. В воде под действием хлора образуются хлорорганические соединения: хлороформ, четыреххлористый углерод, бромхлорметан, хлорфенол, хлорбензолы и хлорфенолукусусные соединения, хлорированные пирены, пиридины и др. Хлорорганические соединения обладают высокой токсичностью, мутагенностью и канцерогенностью. Они способны аккумулироваться в донных отложениях рек, морей, океанов, в тканях гидробионтов, и, в конечном счете, окажутся когда-то в организме человека. Не менее четверти россиян пьют воду с высокой минерализацией и избытком железа, что ведет к сердечно-сосудистым и аллергическим заболеваниям, болезням мочеполовой системы и может привести к более серьезному заболеванию.

В XX веке появились хронические неинфекционные заболевания, несущие существенную угрозу здоровью человека, которые в силу массовости поражения, могут быть отнесены к пандемии. Их причиной являются факторы современной цивилизации: психоэмоциональные стрессы, нарушение питания вследствие загрязненности и других причин социально-экономического характера, техногенных воздействий, нарушение естественных биоритмов и т.д. Это так называемые «болезни цивилизации». К ним относятся практически все неинфекционные заболевания:

сердечно-сосудистые, иммунопатии; опухолевые процессы, психические, обмена веществ. А также болезни, имеющие меньшее значение в разрушении здоровья общества; язвенные болезни и хронические болезни органов дыхания и пищеварения, экземы, нейродермиты, парандотоз, остеохондроз, остеопороз, анемии, болезни нервной системы, бесплодие и многие другие. Возвращаются казалось бы давно искорененные болезни – холера, туляремии, туберкулез, чума, оспа, проказа, саркома и т.д., а многие вирусы переходят из природной среды в искусственную зону, чувствуя себя весьма комфортно, становятся возбудителями гриппа, вирусной формы рака и других болезней.

Концепция демографического развития России на период до 2015 г показывает, что общий риск смерти от всех причин равен $15 \cdot 10^2$ смертей в год, то есть более 15 летальных исходов на 1000 граждан, причем риск преждевременной смерти равен $13 \cdot 10^2$ случаев в год или 85 % от всех смертельных исходов (в развитых странах – не более 50 %). Структура рисков преждевременной смерти в РФ следующая: 54,5 % от социально-экономических причин, 20 % - на экологической основе, 5 % - в результате аварий, катастроф, бедствий, 1,5 % - от преступлений, остальные 19 % от других причин [1].

Причины «средовых болезней» и опасных отклонений в здоровье людей очень разнообразны. Статистика свидетельствует, что 60 – 90 % наиболее грозных раковых заболеваний у человека вызывается факторами окружающей среды: загрязнением канцерогенными веществами воздуха, воды, товаров, качеством питания и лекарств, табаком, наркотиками, алкоголем и т.д. Рак – общечеловеческая проблема: около 2,9 млн случаев ежегодного заболевания отмечается в развитых странах и 3,0 – в развивающихся. Велика угроза здоровью со стороны бактериального загрязнения воды и воздуха. Опасно влияние на здоровье разнообразных вредных веществ: ртути, кадмия, нитратов, пестицидов, асбеста и многих других соединений. С увеличением концентрации дыма в атмосфере способствовало появлению таких болезней, как аллергический ринит, бронхиальная астма, заболеваний крови и кроветворных органов и развитию анемии и эндокринной системы. Особенно резко это проявляется в период внутриутробного развития плода и у новорождённых. Всемирная организация охраны здоровья (ВОЗ) отмечает, что ежегодно по экологическим причинам преждевременно умирают более 13 млн чел, из них 4 млн – дети. Сегодня из 24 % случаев инфекционных заболеваний, отмечаемых в мире, вызваны экологическими причинами, это диарея, респираторные заболевания, малярия, рак, заболевания лёгких и сердечно-сосудистой системы и другие болезни.

Литература

1. Прохоров, Б.Б. Экология человека/Б.Б. Прохоров, М. «Академия», 2003.- 320 с.

Основные загрязнители аграрной продукции

Производимая сельскохозяйственная продукция по своим качественным свойствам не всегда соответствует эколого-токсикологическим нормам. В большинстве своем она в той или иной форме содержит в себе вредные для организма человека и сельскохозяйственных животных вещества. К загрязнителям продуктов питания относят тяжелые металлы и различные химические соединения, вносимые с пестицидами и удобрениями и другими агрохимикатами. Наиболее опасными загрязняющими веществами признаны тяжелые металлы, например, к ним относят свинец, ртуть, кадмий, мышьяк, цинк, никель и т.д. Примерно 90 % тяжелых металлов, поступающих в окружающую среду, аккумулируются почвами. Затем они мигрируют с нисходящими токами в грунтовые воды, и попадают в водоносные слои, часть из них через растения поступает в пищевые цепи или напрямую – с питьевой водой в организм животного или человека. Наиболее опасными загрязнителями являются ртуть, кадмий, мышьяк и цинк, потому что техногенные выбросы этих элементов в окружающую природную среду происходят высокими темпами. Эти вещества обладают большим сродством с физиологически важными органическими соединениями и способны подавлять значимые процессы обмена веществ, тормозить рост и развитию растений. Так, например, у растений наблюдается уменьшение фотосинтетической активности, ухудшение качества произведенной продукции. Допустимое количество тяжелых металлов, которое человек может «употреблять» с продуктами питания в течение недели без риска заболеть, колеблется в зависимости от вида металла, например: свинец – 2 мг, кадмий – 0,4–0,5 мг, ртуть – 0,3 мг. В живых организмах тяжелые металлы в малых количествах играют положительную роль. В ультрамикродозах они входят в состав биологически активных веществ, регулирующих нормальный цикл процессов жизнедеятельности организмов, являются своего рода катализаторами, протекающих в организме реакций.

Нарушение в результате техногенного загрязнения эволюционно сложившихся концентраций тяжелых металлов приводит к негативным или даже катастрофическим последствиям для живых организмов. Поступившие в организм человека тяжелые металлы накапливаются в основном в печени и выводятся они оттуда крайне медленно. Продукция растениеводства, выращенная даже на слабозагрязненных почвах, вызывает кумулятивный эффект, способствуя постепенному увеличению содержания тяжелых металлов в организме теплокровных. Поступая в растения, тяжелые металлы распределяются в органах и тканях очень неравномерно. Следовательно, зная особенности аккумуляции тяжелых

металлов в органах растений, можно ограничить их поступление в организм животных и человека.

Например, корневая система растений зачастую содержит больше цинка, чем их надземные части (цинк концентрируется в основном в старых листьях). Уровень концентрации тяжелых металлов в репродуктивных органах растений значительно ниже, чем в вегетативных и зависит от биологических особенностей культуры, физиологической роли элемента, его содержания и доступности для растений. Органы накопления продуцентов (корнеплоды, клубни картофеля, плоды) накапливают значительно меньше тяжелых металлов, чем их надземная вегетативная масса. Механизм поглощения, транспортировки по сосудам, обмена и распределения тяжелых металлов в органах и тканях растений тесно связан с видовыми и сортовыми особенностями культур, серьезное влияние оказывают также экологические и антропогенные факторы воздействия. Знание распределения тяжелых металлов в тканях и органах растений дает возможность выяснить механизмы их перераспределения и аккумуляции в процессе развития растений, что крайне необходимо для разработки достоверных методов оценки качественного состояния урожая (В.А. Черников [и др.], 2004).

Накопление и распределение тяжелых металлов в органах растений, прежде всего, зависит от вида и морфологических признаков отдельных органов. В корнеплодах моркови содержание тяжелых металлов (исключая Fe) убывает от кончика корня до головки. Для железа характерно повышенное содержание в головке и равномерное распределение в остальной части корнеплода. В центральной части корнеплода содержится наибольшее количество цинка и свинца, а в коре — меди, марганца, кадмия и железа. Наименьшее количество кадмия, цинка, свинца находится в мякоти клубня картофеля, повышенное количество характерно для периферийной его части. Медь распределяется равномерно по всему клубню картофеля.

К серьезной проблеме здорового питания населения можно отнести содержание в продуктах питания многих опасных пестицидов, у которых период распада протекает за большой промежуток времени, поэтому их наличие строго регламентируется государственными органами. В РФ и за рубежом разработаны национальные нормативы допустимых остаточных концентраций (ДОК). Многие из них совпадают с российскими нормами, другие — выше или даже ниже их.

Концептуальные основы современного земледелия — это экологическая безопасность, экономическая эффективность и социальная целесообразность приобретают общую значимость в условиях радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий. Интенсивность миграции радиоактивных веществ по трофическим цепям: радиоактивные вещества > почва > растение > животное > человек, определяется свойствами почв и радионуклидов, а также особенностями растений, сельскохозяйственными технологиями и социально-экономическими условиями.

Почвенный покров является основным местом аккумуляции техногенных загрязнителей, их активным преобразователем и интегральным индикатором состояния наземных экосистем в связи с загрязнениями. Именно в почве начинается движение радионуклидов как в большом геологическом, так и в малом биологическом круговороте веществ. Об антропогенном загрязнении почв и растительной продукции свидетельствуют данные исследований кафедры почвоведения Брянской сельскохозяйственной академии (Е.В. Просянников [и др.], 2002). Радиоактивные элементы представляют наиболее опасный источник загрязнения окружающей среды, в том числе сельскохозяйственного производства. Это вызвано тем, что даже небольшое их количество приводит к опасному ухудшению качества продукции и воздействию на живые организмы.

Исследования показали, что радиационная обстановка на сельскохозяйственных землях Центрального и Центрально-Черноземного регионов страны до аварии на ЧАЭС по медицинским нормам была удовлетворительной и осуществление каких либо дополнительных мер не требовалось. Однако, после аварии на ЧАЭС радиационный фон в данных регионах существенно изменился в худшую сторону. Основная часть радиоактивных веществ поступили в атмосферу в первые десять дней после аварии с двумя пиками активности 26.04 и 05.05. 1986 г. В начале преобладал дозообразующий изотоп йод-131 (около 30 % от общей активности, $T_{1/2} = 8,2$ дня) и цезий-134 ($T_{1/2} = 2$ года).

В РФ авария на ЧАЭС привела к радиоактивному загрязнению территории Белгородской, Брянской, Воронежской, Калужской, Орловской, Ленинградской, Рязанской, Тамбовской, Тульской областей, в меньшей мере других (С.М. Усманов, 2001). Результаты обследования почв показывают, что после аварии загрязненных площадей пашни от 1 до 15 $\text{Ки}/\text{м}^2$ было здесь 539,5 тыс. га (29,9 %), сенокосов и пастбищ – 136,5 тыс. га (51,8 %), садов – 6,8 тыс. га (68,1%). Основными загрязнителями растениеводческой и животноводческой продукции в Центральной лесостепи выступают радиоактивные изотопы цезия-134 и 137, а в некоторых районах и стронция-90. Эти радионуклиды, наряду с высокой биологической доступностью, обладают большим периодом полураспада (30,17 лет – для цезия-137, 2,06 года – цезия-134, 28,1 года – стронция-90), что определило длительность сохранения высокого радиационного фона на территории области. Однако, с 1994 г. отмечено заметное снижение содержания радионуклидов в почве. По сравнению с 1986 г. уровень гамма-радиации уменьшился в Орловской области в 5-7 раз. По прогнозам ближайшие годы радиационно-опасных почв (свыше 5 $\text{Ки}/\text{км}^2$) даже в наиболее неблагоприятных районах области останется всего 1515 га, а 2014 г. их вообще не станет, сохранятся лишь почвы с уровнем загрязнения от 1 до 5 $\text{Ки}/\text{км}^2$

Использование современных мобильных устройств для проведения аттестации рабочих мест по условиям труда

В настоящее время идет полномасштабная работа по проведению аттестации рабочих мест по условиям труда (далее, аттестация). В рамках аттестации осуществляется сбор информации по условиям труда на рабочих местах и оформление документации в соответствии с действующим порядком^[1]. В наше время в процесс оформления документации уже основательно вошли специальные программные средства, позволяющие автоматизировать данную процедуру от момента ввода сведений до распечатки готового отчета (ПО «Аттестация», «ТрудЭксперт» и др.). Без данных программ уже немыслима работа аттестующих организаций.

Работу по аттестации рабочих мест условно можно разделить на два этапа:

- первичный сбор данных непосредственно на рабочих местах в рамках проведения измерений и оценки факторов производственной среды;
- оформление документации за персональным компьютером в соответствии с утвержденным порядком.

Если второй этап полностью автоматизирован за счет упомянутых выше программ, то этап первичного сбора данных (сведения о рабочих местах и результаты проводимых измерений) еще никак не автоматизирован. На данном этапе результаты измерений, как правило, записываются в журнал измерений, а иногда - и просто на обычные листы бумаги. Речь об автоматизации первичного сбора данных шла давно, но решение упиралось в отсутствие мобильных устройств (компьютеров), обеспечивающих удобный ввод данных в полевых условиях.

В последние годы большую популярность получили мобильные устройства с сенсорными экранами большого размера - планшеты. Планшет замечательно подходит для эксплуатации в полевых условиях, имеет средства для удобного ввода данных за счет большого экрана (в отличие от мобильных телефонов) и возможность длительной работы от автономного источника питания.

В этих условиях, автором была предпринята попытка разработки мобильного приложения, обеспечивающего первичный сбор данных при проведении аттестации, интегрированного с программным комплексом «Аттестация», широко распространенным среди аттестующих организаций.

Мобильное приложение имеет следующие функции:

- импорт сведений о рабочих местах из программы «Аттестация»;
- ввод результатов измерений по заранее разработанным шаблонам;

- ввод дополнительных сведений о рабочем месте, включая фотографию, сделанную с камеры мобильного устройства;
- экспорт результатов измерений в программу «Аттестация» для дальнейшего оформления документации.

Таким образом, данный модуль обеспечивает решение следующих задач:

- исключает рукописный ввод на бумажный носитель при проведении измерений;
- позволяет оценить полноту и корректность вносимых сведений непосредственно на месте проведения измерения;
- исключает повторный ввод результатов измерений в программу «Аттестация» для оформления документации за счет функций импорта-экспорта между программами. Обмен данными между приложениями осуществляется через файлы импорта в формате XML.

Мобильное приложение реализовано для установки на планшетах с предустановленной операционной системой «Android» версии 3 и выше.

ОС «Android» была выбрана на основании следующих преимуществ:

- широкое распространение;
- активное развитие на протяжении достаточно длительного периода времени;
- наличие бюджетных моделей со стоимостью значительно более низкой, чем у конкурентов (iPad, Microsoft Surface).

На данный момент приложение проходит тестирование в нескольких аттестующих организациях.

Литература

1. **Порядок** проведения аттестации рабочих мест по условиям труда, утв. Приказом Минздравсоцразвития России от 26 апреля 2011 г. N 342н.

УДК 614.841

М.Ю. ОВСЯННИКОВ, к.т.н., доц., нач. кафедры,
А.К. СОКОЛОВ, д.т.н., профессор,
Е.Г. АВДЮНИН, д.т.н., профессор
(ФГБОУ ВПО ИВи ГПС МЧС России) г. Иваново

Размещение автоматических пожарных извещателей на объектах с интенсивной вентиляцией помещений

Работа посвящена исследованию влияния кратности воздухообмена в помещении на размещение автоматических пожарных извещателей (далее – ПИ) на объектах с интенсивной вентиляцией помещений. Рассмотрен случай воздухообмена двух смежных помещений, когда из помещения удаляется воздух механической вентиляцией и при

движении газов через проёмы между помещениями, помещением и атмосферой реализуются режимы всасывания, т.е. воздух поступает из смежного помещения, а в смежное помещение – из атмосферы.

Под кратностью воздухообмена помещения понимается отношение объёмного расхода воздуха (газа в помещении) к объёму помещения.

В жилых сооружениях полный объем воздуха должен замениться свежим как минимум, один раз в час. В офисах, по европейским стандартам, от трех до восьми раз, на вредных, термических, взрывоопасных производствах кратность воздухообмена достигает ста раз и выше [4]. В нашей стране требования к вентиляции помещений приведены в правилах [5] и правилах на проектирование объектов разного функционального назначения.

Методика выбора тепловых и дымовых ПИ и определения расстояния между ними приведена в рекомендациях [1].

При выборе типа ПИ может быть произведен расчет времени наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара (ОФП) и соответственно величины очага пожара, который должен быть обнаружен.

Методика позволяет рассчитывать максимально допустимые расстояния между точечными тепловыми и дымовыми пожарными извещателями в защищаемых помещениях в зависимости от следующих параметров: темпа развития возможного пожара; предельно допустимой тепловой мощности очага пожара к моменту его обнаружения; характеристик пожарных извещателей; высоты помещения; температуры воздуха в помещении до пожара.

В качестве критерия своевременности обнаружения пожара в защищаемом помещении принимается условие срабатывания пожарных извещателей в момент достижения тепловой мощностью очага горения своего предельно допустимого значения, определяемого с учетом возложенной на автоматические установки пожарной сигнализации задачи (цели функционирования сигнализации) по обеспечению безопасности людей и/или материальных ценностей.

Выбор тепловых ПИ осуществляется исходя из параметров извещателей, которые характеризуются температурой срабатывания и временем срабатывания. Эти параметры устанавливаются в технических условиях (далее – ТУ) на ПИ. Дополнительно, в соответствии с положениями ГОСТ 50898 [2], определяется селективная чувствительность ПИ, которая может использоваться для сравнительной оценки инерционности различных тепловых ПИ.

При использовании оптических или ионизационных ПИ учитывается, что оптико-электронные и ионизационные (в том числе радиоизотопные) ПИ по-разному реагируют на различные виды дымов горючих материалов.

В соответствии с ГОСТ Р 50898 [2] определяется селективная чувствительность ПИ к дымам различных видов горючих материалов. Параметр «селективная чувствительность» измеряется временем срабатывания при воздействии различных дымов и характеризует не только чувствительность дымового ПИ, но и его инерционность.

Методика выбора тепловых и дымовых ПИ и определения расстояния между ними [1] не учитывает влияние возможного интенсивного газообмена помещений (кратности) на обнаружение пожара в нём.

Одним из направлений установления влияния вентиляции помещения на время обнаружения пожара системами пожарной сигнализации является математическая постановка задачи и проверка наличия этого влияния с помощью численного эксперимента. В настоящей работе исследование динамики ОФП проведено применительно интегрального термодинамического метода математического моделирования пожара. Следует отметить, что решение уравнений этой модели в общем случае возможно лишь численным методом, система дифференциальных уравнений является жёсткой [3].

Разработанная математическая модель тепло- и массообменных процессов для определённого класса пожара, характеризующихся незначительным изменением внутренней энергии помещений при пожаре, позволила получить аналитические решения уравнений пожара, значительно сократить трудоемкость моделирования.

Проверка решений влияния кратности воздухообмена на динамику развития пожара в помещении проведена на примере двух параметров пожара, таких как температура и оптическая плотность дыма в помещении, что соответствует видам контролируемых параметров пожарной сигнализации.

Полученные аналитические решения уравнений пожара и проведённый численный эксперимент позволили установить наличие влияния кратности воздухообмена в помещении при пожаре на работу пожарной сигнализации.

Результаты работы рекомендуется использовать при решении практических задач широким кругом пользователей, без проведения трудоёмких расчётов на ЭВМ, для выбора тепловых и дымовых ПИ и определения расстояния между ними.

Литература

1. Средства пожарной автоматики. Область применения. Выбор типа. Рекомендации // Проектирование, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения и пожарной сигнализации: Сб. норм. док-ов. – Вып. 16. ч. 4 - М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2005. - С.370-415.
2. ГОСТ 50898-96 Извещатели пожарные. Огневые испытания.
3. **Овсянников М.Ю.** Динамика опасных фактов пожара в помещениях при работе противодымной вентиляции: монография. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2007. – 175 с.
4. Вентиляция и кондиционирование\ <http://www.stmaster.ru/vent.php>
5. СП 60.13330.2013 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.

Г.В. ПОПОВ д.т.н., профессор,
С.И. РОМАНИШИН,
Д.А. СТЕПАНОВ, студ.
(ИГЭУ) г. Иваново

Отладка многофункционального тренажера «Ambu Man» для проведения сердечно-легочной реанимации

Изучение методов оказания первой медицинской помощи пострадавшему, является важным аспектом обучения специалистов в сфере безопасности жизнедеятельности и охраны труда. Как в обычной жизни, так и на каком – либо производстве, порой происходят происшествия, влекущие за собой самые различные экстремальные ситуации, при которых оказание первой медицинской помощи играет важную роль сохранения человеческой жизни.

Целью данного исследования является изучение методов сердечно-легочной реанимации (в частности искусственной вентиляции легких и наружного массажа сердца) при помощи тренажера Ambu Man и, как следствие, приобретение навыков её правильного выполнения пострадавшим, у которых произошла остановка сердца или дыхания.

Тренажер Ambu Man представляет собой манекен, соответствующий размерам взрослого человека, снабженный инструментальной доской в области живота. В основном, тренажер предназначен для освоения элементов первичной сердечно-легочной реанимации (обеспечение проходимости верхних дыхательных путей, искусственного дыхания и непрямого массажа сердца). В том числе имеется уникальная возможность изменения ригидности грудной клетки, т.е. изменение её жесткости. Имеется возможность персональной отработки навыков и отработки навыков в команде. С помощью этого манекена может проводиться обучение и постоянный тренинг сотрудников экстренных медицинских и немедицинских служб (спасатели, пожарные, милиция и т.п.), а также обучение широких слоев населения, в том числе и в рамках программ охраны труда.

Данный тренажер имеет возможность работы, как в обычном режиме, так и при взаимодействии с ПК через USB кабель. Взаимодействие с ПК осуществляется при помощи специальной обучающей программы, являющейся дополнением к данному тренажеру. Обучающая программа имеет возможность создания базы данных, в которой может содержаться подробная информация об обучающемся, с записью его всевозможных тренировок.

Отличительной особенностью обучающей программы тренажера Ambu Man, является наличие готовых алгоритмов для обучения сердечно-легочной реанимации.

Среди них содержатся алгоритмы:

- AHA (Ассоциации сердца. Америка),
- ARC (Австралийского совета по реанимации),
- CLAR (Латиноамериканского совета реанимации),
- ERC (Европейского совета по реанимации),
- HSFC (Фонда сердца и инсульта. Канада),
- ILCOR (Международного Комитета по связям Реанимации),
- RCSCA (Совета Реанимации Южной Африки).

Также имеется возможность создания новых алгоритмов для отработки навыков сердечно-легочно-мозговой реанимации, при помощи которых, появляется возможность организации индивидуальных тренировок.

Еще одной отличительной особенностью обучающей программы является возможность отдельной отработки навыков, в плане НМС* и ИВЛ*. Обучающийся может отдельно проработать процесс выполнения НМС и ИВЛ и, в конечном итоге, произвести совместное выполнение данных упражнений с итоговой оценкой полученных им навыков. Рассмотрим более подробно оценочную систему обучающей программы тренажера Ambu Man.

В процессе выполнения упражнений, программа пишет, так называемое «поле ЭКГ», как отдельно для НМС, так отдельно и для ИВЛ. Область написания «поля ЭКГ», имеет несколько границ, означающие минимальное, оптимальное и превышающее значение количества поступающего воздуха (при ИВЛ) и силы надавливания на грудную клетку (при НМС).

На графическом изображении «поля ЭКГ», при помощи специальных знаков, указывается неправильная постановка рук (при выполнении НМС) и попадание воздуха в желудок (при выполнении ИВЛ).

Также имеется возможность оценки полученных навыков при помощи количественного и процентного соотношения верно и неверно выполненных действий, согласно алгоритму, который используется в процессе выполнения упражнений сердечно-легочной реанимации.

** Примечание: ИВЛ – Искусственная вентиляция легких, НМС – непрямой (наружный) массаж сердца.*

В заключении хочется сказать, что тренажер Ambu Man. оказывает большой вклад в модернизацию процесса обучения методам сердечно-легочно-мозговой реанимации. Инновационные технологии, делают возможность получения качественных знаний и навыков более доступной, что заметно увеличивает уровень подготовки специалистов в сфере безопасности жизнедеятельности и охраны труда.

Г.В. ПОПОВ д.т.н., профессор,
А.И. ТИХОНОВ к.т.н., профессор,
И.С. ТЮЛЕНЕВ студент
(ИГЭУ) г. Иваново

Оценка механической прочности баков силовых трансформаторов при возникновении внутренних коротких замыканий

Для трансформаторов класса напряжения 35 кВ мощностью до 10000 кВА в последнее время весьма распространенной стала тенденция компенсации температурного расширения масла посредством изготовления бака, меняющего свой внутренний объем. Такой бак получил название гофробака, поскольку его стенки выполнены в виде «гармошки», т.е. по периметру бака расположены так называемые гофры.

В данном случае тепловое расширение масла компенсируется не с помощью расширителя, а упругими деформациями тонкостенных гофрированных металлических пластин бака. Характерной особенностью данного типа маслонаполненного оборудования является изоляция внутреннего объема бака трансформатора от окружающей среды, что значительно улучшает условия работы масла, практически исключает его увлажнение, окисление и шламообразование. При этом обязательным условием качественного исполнения герметичных трансформаторов также является глубокая дегазация трансформаторного масла перед его заливкой.

На трансформаторах с гофробаком, ввиду отмеченных конструктивных особенностей, не устанавливается газовое реле и предохранительный клапан.

Специальные испытания и опыт эксплуатации показал, что возникновение дуги внутри гофробака не приводит к взрыву. Причина тому – меньшая жесткость металлических стенок гофробака (толщина стенки около 1 мм) по сравнению с баком обычного масляного трансформатора, в котором толщина стенки составляет 2,5 - 4 мм. При внезапном росте давления внутри гофробака происходит местный разрыв гофры с выходом образовавшегося газа и вытеканием масла, при этом избыточного давления, приводящего к взрыву, не образуется. Однако разлив масла и наличие виткового замыкания могут привести к пожару.

Была поставлена задача – оценить пределы прочности гофробака, для чего рассчитать параметры его разгерметизации при возникновении избыточного давления. Для этого был применен программный комплекс Cosmos-Solid Works, в рамках которого была разработана расчетная модель гофробака. Ниже приведено описание этой модели и проведенных вычислительных экспериментов.

Для упрощения достаточно сложной задачи рассматриваем только одну гофру. При этом считаем, что в наиболее опасных условиях находятся крайние гофры, расположенные на длинной стороне бака.

Экспериментально было установлено, что при избыточном давлении они раздуваются сильнее всех остальных гофр.

В пакете Solid Works строим модель одной гофры в виде прямоугольника с длиной 900 мм, шириной 360 мм, толщина 6 мм. От конструктивных скруглений в модели отказываемся, так как на этих участках Cosmos Works строит очень мелкую сетку, что, как позднее выяснилось, существенно увеличивает расчетное время.

С той стороны, где гофра стыкуется с баком, реализуем жесткую заделку. Ко всем граням полученной «коробки» прикладываются распределенные силы, создаваемые внутренним давлением. Модель сил и перемещений – оболочечная, нелинейная. Задаем достаточно грубую сетку, что позволяет решить нелинейную задачу за 10 – 15 мин. Для более точных сеток подобная задача решается за 2 и более часа. Расчетная погрешность на выбранных нами сетках достигает 5-10%, что в нашем случае это вполне приемлемо.

В качестве материала использовалась пластичная сталь II-СВ-08Ю (ГОСТ 9045-93) толщиной 1,2 мм.

Характеристики стали:

- предел текучести – $2,05 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$;
- предел прочности – $3,4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$;
- модуль упругости – $2,05 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$;
- коэффициент Пуассона – 0,29.

Cosmos Works позволяет решать задачи тремя методами:

- 1) метод сил: задаются силы – определяются перемещения;
- 2) метод перемещений: задаются перемещения – определяются силы;
- 3) метод длины дуги: метод основан на идее продвижения вдоль множества возможных решений с учетом информации о предыдущих шагах.

Первоначально зададимся избыточным давлением в 1 атм. Давление нарастает по линейному закону в течение 1 секунды. Для решения задачи выбрана программа Directsparse, с помощью которой решение на каждом шаге осуществляется прямым методом.

При появлении сминания листовой стали, рекомендуется выбирать метод длины дуги. Однако попытка решить нашу задачу этим методом длины дуги регулярно приводила к сбою программы именно в тех точках, где после достижения предела прочности при сжатии в центре гофры возникает сминание, приводящее в итоге к ее деформации. Все попытки с помощью многочисленных настроечных параметров повлиять на ход расчета не привели к успеху. Поэтому было принято решение остановиться на методе управления силой. Это не совсем корректно, так как данный метод не допускает возможностей образования сминания, в результате которого на листовой стали образуются выраженные складки. Вместо этого имитируется процесс упругой и пластической деформации, который резко не снимает возникшего в

данных точках напряжения, как в случае сминания. Это оказалось еще одним допущением при решении рассматриваемой задачи.

Тем не менее, мы считаем, что можно пойти на данное допущение, так как оно касается только тех участков, на которых возникают сверхдопустимые напряжения сжатия. Понятно, что при этом сталь испытывает сверхкритические нагрузки. Однако в реальности эти нагрузки еще не приводят к разрушению листовой стали, так как она только сминается, снимая напряжение.

Специфика поставленной задачи такова, что нас больше интересуют напряжения растяжения, чем сжатия. В этом плане метод сил, как нам представляется, вполне пригоден, так как на участках, где возникают максимальные напряжения растяжения, никаких сминаний стали не происходит. Наоборот она расправляется и растягивается. Именно эти участки представляют наибольший интерес, так как именно здесь следует ожидать повреждения сварных швов.

Вычислительный процесс этой задачи оказывается крайне неустойчивым. Очень часто он оканчивается закливанием. Дело в том, что по мере роста нагрузки по методу сил в местах концентрации напряжения сжатия возникают так называемые «особые точки», в которых расчетный процесс сталкивается с неоднозначностью дальнейшего процесса. Например, нет однозначного ответа, в каком из равновероятных направлений будет деформироваться конкретный участок. В реальных условиях здесь многое зависит от складывающихся обстоятельств. Поэтому в расчетный процесс вводится коэффициент устранения особой точки, выбор которого, как показали многочисленные эксперименты, зависит от конкретных неформализуемых условий. Обычно он подбирается интуитивно. Для каждой нагрузки этот коэффициент может быть различным. Какую-то закономерность выявить удастся далеко не всегда.

Анализ результатов показывает, что наибольшие напряжения сжатия возникают в центре гофры, где она деформируется в наибольшей степени. Величина максимального напряжения сжатия составляет $7,134 \cdot 10^8$ Н/м². Следует отметить, что предельно допустимое напряжение для выбранной стали составляет $3,4 \cdot 10^8$ Н/м². Это говорит, что в этих областях произойдет сминание стали, которое приведет к возникновению микротрещин. Если не принять срочных мер и продолжать эксплуатировать трансформатор, то в результате разгерметизации бака возникнет течь масла с возможностью возникновения пожара. Однако если говорить о конкретном аварийном режиме, то разрыва здесь не произойдет.

Как показывает анализ серии расчетов, наибольшие напряжения растяжения, приводящие к разрыву гофры, достигаются в точках, расположенных на верхних и нижних ребрах гофры в местах, где происходила сварка гофры и стенки бака.

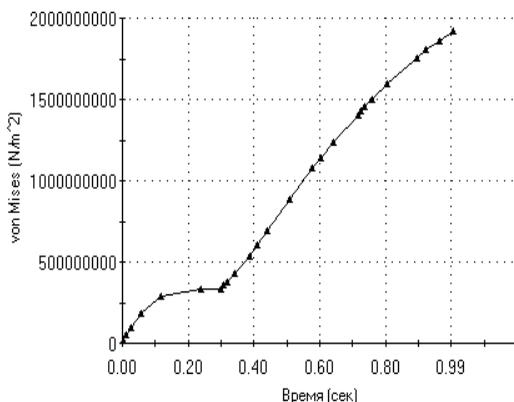


Рис. Эпюра нелинейного узлового напряжения растяжения гофры

На рисунке показана динамика роста напряжения в точке, расположенной на сварном шве гофры.

Давление нарастает по линейному закону в течение 1 секунды до 1 атм. На рисунке видно, что относительно безопасным давлением, которое может выдержать гофра является давление 0,3 атм.

Следует отметить существенное влияние на результаты эксперимента фактора случайности. И это касается не только такого фактора, как качество сварки. Как показал анализ результатов, несмотря на симметрию модели, на верхних и нижних кромках гофры достигаются различные напряжения. Это происходит из-за наличия выше упомянутых особых точек, в которых поиск решения ищется путем выбора одного из вероятных направлений деформации. Другими словами, в самом расчете заложен фактор случайности. Так и в реальных условиях невозможно предсказать, где конкретно сомнется гофра, и какими будут последствия ее деформации.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

Проведенные вычислительные эксперименты по оценке прочности элементов гофробака позволили установить напряжения растяжения и сжатия, которые могут выдерживать без разрушения гофры бака при увеличении внутреннего давления и тем самым определить область, в которой гарантировано отсутствие тяжелых последствий в виде возникновения пожара.

Аналогичные расчеты и оценки должны проводиться при проектировании новых типов трансформаторов с гофробаком.

Анализ показателей опасности загрязнения окружающей среды техногенными источниками

Опасность загрязнения *приземной атмосферы* j -м производственным объектом O_{aj} определяется по формуле

$$O_{aj} = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot M_i),$$

где n - число ингредиентов загрязняющих веществ, A_i - коэффициент опасности i -го вещества, усл.ед., M_i - масса i -го вещества, поступающего в атмосферу от всех i источников j -го производственного объекта, тыс.т.

Коэффициент опасности i -го вещества A_i :

$$A_i = \frac{1}{C_i} \cdot \Pi_1 \cdot \Pi_2 \cdot \Pi_3, \text{ усл.ед.},$$

где C_i - лимитирующая концентрация i -го вещества в организме человека вследствие дыхания, Π_1 - поправка на рассеивание i -го вещества в приземной атмосфере, Π_2 - поправка на вероятность накопления i -го вещества в природных компонентах, Π_3 - поправка на воздействие i -го вещества на различные реципиенты помимо человека.

Величина лимитирующей концентрации C_i :

$$C_i = \frac{\text{ПДК}_{\text{ис.с.}}}{m}, \text{ (усл.ед.)},$$

где $\text{ПДК}_{\text{ис.с.}}$ - среднесуточная ПДК i -го загрязнителя, мг/м; m - средняя масса человека.

Суммарная величина массы загрязняющих веществ M определяется массами выбросов ингредиентов загрязнений, имеющимися в данном производственном объекте источниками:

$$M = M_1 + (M_2 + M_3 + M_4) \cdot h,$$

где M_1 - масса выбросов от организованных стационарных источников, тыс.т.; M_2 - масса выбросов от неорганизованных стационарных источников, тыс.т.; M_3 - масса выбросов от подвижных источников, тыс.т.; M_4 - масса выбросов от децентрализованных источников теплоснабжения, тыс.т.; h - поправочный коэффициент малой высоты источников выбросов, увеличивающий опасность загрязнения.

При наличии в производственном объекте выбросов M_1 и M_2 их значения выбираются из нормативных источников, тогда как значения присутствующих выбросов M_3 и M_4 определяются расчетным путем.

Масса выбросов M_3 определяется, исходя из объемов потребленного топлива (бензина или дизельного топлива):

$$M_3 = M \cdot d \cdot 10^{-3}, \text{ тонн,}$$

где M - масса потребленного топлива, тонн; d - удельные выбросы ингредиентов загрязнения на единицу топлива, кг/т.

Масса выбросов от децентрализованных источников теплоснабжения определяется аналогично

$$M_4 = M \cdot d \cdot 10^{-6}, \text{ тонн.}$$

Степень опасности загрязнения и нарушения состояния *земельных ресурсов* определяется уровнями нарушения почвенных покровов и техногенными изменениями рельефа.

Определение степени нарушения земель и ответственности производственных объектов производится в двух направлениях, обусловленных основными типами землепользования: промышленно-транспортным и сельскохозяйственным.

В основе расчета показателей лежит единый принцип, основанный на определении площадей, нарушение которых по тому или иному признаку превышает нормативное значение, принятое соответствующими нормативными и правовыми документами, или определенное экспериментально.

Опасность химического загрязнения почв определяется массой поступающих в почвы загрязняющих веществ, их токсичностью и площадью распространения. Основными загрязняющими веществами являются используемые пестициды и осаждающиеся из атмосферы выбросы вредных веществ от производственных объектов.

Масса ингредиентов загрязняющих веществ определяется среднеарифметическим (за последние 3 – 5 лет) количеством использованных видов пестицидов и объемов промышленных выбросов в атмосферу.

$$M = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot Z + M_i^2 \cdot Z_i^2(T)),$$

где M - масса поступивших в почву загрязняющих веществ, n - число ингредиентов загрязнения, M_i - масса i -го вида использованных пестицидов, Z - поправка за поглощение пестицидов растительностью, M_i^2 - масса i -го загрязняющего вещества, выброшенного в атмосферу i -м промышленным источником, Z_i^2 - поправка на воздушную миграцию загрязняющих веществ в атмосфере.

Поправка на поглощение пестицидов растительностью принимается на уровне 0,5; на воздушную миграцию загрязняющих веществ - рассчитывается.

Из числа поступивших в почвы загрязняющих веществ выбираются 10 наиболее опасных ингредиентов по наибольшим значениям соотношения их массы M_i к предельно допустимой концентрации ПДК $_i$, т.е. $M_i/\text{ПДК}_i$. Для данных ингредиентов рассчитываются их примерные концентрации в почве C_i :

$$C_i = \frac{M_i}{S_i} \cdot h \cdot K_p,$$

где M_i - масса поступившего в почвы i -го загрязняющего вещества; S_i - площадь распространения i -го загрязняющего вещества; h - мощность слоя загрязнений почвы; K_p - коэффициент соразмерности.

Используя значения концентраций десяти взятых загрязняющих веществ и их предельно-допустимых концентраций в почвах, рассчитывается показатель химического загрязнения - ПХЗ:

$$\text{ПХЗ} = \frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_{10}}{\text{ПДК}_{10}},$$

По значениям ПХЗ проводится градация опасности химического загрязнения почв: слабая (ПХЗ < 1), средняя (ПХЗ от 2 до 5), сильная (ПХЗ от 6 до 10) и чрезвычайная (ПХЗ > 10).

Используя показатели градации по значениям ПХЗ рассчитываются индексы плотности химической деградации почв территории и общая площадь суммарной опасности сверхнормативного химического загрязнения.

Оценка интегральной экологической опасности (нарушенности) земель производственной деятельностью на территории (O_3) определяется суммой опасностей всех видов нарушений:

$$O_3 = \sum_{i=1}^8 (O_3)_i,$$

где $(O_3)_i$ - значение опасности нарушения земель за счет эрозии, подтопления, просадки грунтов и погребения под отвалами и свалками, химического загрязнения, засоления, закисления, дегумусирования в результате отчуждения их под различные виды землепользования.

Опасность воздействия на *водный объект* измеряется объемом воды, необходимой для восстановления вызванного данным нарушением естественного баланса водной системы (объемом разбавления загрязненных стоков и пополнения изъятых безвозвратно вод), скорректированных соответствующим экологическим коэффициентом экологической значимости воздействия.

В основе расчетов всех видов экологических опасностей воздействия на водный объект лежит общий принцип, основанный на определении объемов загрязненных стоков (изъятых вод) и размеров превышения (нарушений) их нормативных уровней:

$$O_{gi} = K_i \cdot V_i + \frac{W_i}{N_i}, \text{ тыс. м}^3,$$

где K_i - коэффициент значимости i -го вида нарушения, V_i - объем загрязненного стока i -го вида нарушений или безвозвратного водопотребления, тыс.м³; W_i - величина i -го вида нарушения; N_i - нормативное значение i -го вида нарушения.

Структурные и функциональные особенности системы оценки техногенной безопасности территориального комплекса

Эффективное управление территориально-природным комплексом (ТПК) невозможно без применения специальных методов анализа и управления техногенным, социальным и экологическим рисками.

Функция управления риском становится одним из важных условий обеспечения техногенной безопасности ТПК.

Анализируемыми объектами воздействия в ТПК являются техногенные объекты, промышленные предприятия, энергетические объекты и др.), население, экосистемы, атмосферный воздух, водные объекты, почвы, биоресурсы.

Источники техногенной опасности по виду воздействия (нанесения ущерба) делят на источники техногенной и экологической опасности (при систематических негативных воздействиях) и источники повышенной опасности (в аварийных ситуациях).

В качестве процедур, применяемых для обеспечения техногенной безопасности ТПК рассматриваются следующие: анализ источников техногенных опасностей; оценка негативных воздействия источников опасностей; управление уровнем техногенной безопасности с целью предотвращения и снижения тяжести негативных воздействий источников опасности.

Основными целями анализа техногенной безопасности в разработанной системе оценки техногенной безопасности ТПК являются:

1. Определение критического уровня напряженности экологической обстановки;
2. Определение критической степени антропогенного воздействия на экосистемы;
3. Определение критического уровня общей загрязненности среды и ее влияния на заболеваемость населения;
4. Оценка величины риска для населения и состояния экосистем при эксплуатации техногенных источников;
5. Оценка степени опасности загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов;
6. Оценка степени опасности загрязнения почвы населенного пункта для здоровья населения.

Анализ риска представляет собой последовательность действий, упорядоченную по следующим этапам: 1) числовая оценка риска; 2) анализ структуры риска; 3) управление риском.

Для определения приемлемого риска важны выделение отдельных элементов риска, общая оценка риска и сопоставление с фактическими показателями в менее рискованных областях.

Управление экологическим риском может быть определено как процесс подготовки и реализации мероприятий, цель которых – уменьшение возможных негативных экологических последствий и оценки воздействия на составляющие окружающей среды техногенных источников опасности.

В качестве управляемого объекта выступает ТПК, а управляемыми переменными являются уровни техногенного, социального и экологического рисков, для снижения которых разрабатываются мероприятия.

Алгоритм управления техногенным, социальным и экологическим рисками в системе оценки техногенной безопасности ТПК представляет собой цепь с обратной связью, которую замыкает функция “координация управления риском”, формирующая контуры взаимодействия между подсистемами.

Контроль риска функционирования ТПК происходит следующим образом. Информация о переменных, характеризующих техногенное воздействие на ТПК и состояние окружающей среды, собирается и перерабатывается в блоке “Среда функционирования”, а результаты передаются в блок “Анализ факторов и оценка уровня техногенного, социального и экологического рисков”. При этом результаты обработки информации должны сохраняться на достаточно длительный срок для возможности сравнительного сопоставления при последующих процедурах анализа риска.

В подсистеме “Анализ факторов и оценка уровня техногенного, социального и экологического рисков” информация о техногенном воздействии с необходимыми нормативно-справочными данными обрабатывается с помощью методов, перечисленных ниже

В подсистеме применяются следующие методы анализа техногенных опасностей и оценки рисков:

1. Оценка демографической емкости и репродуктивной способности территориального комплекса;
2. Оценка экологической техноемкости территории с учетом экологической емкости среды;
3. Оценка предельно допустимой энергетической нагрузки (ПДЭН) и антропогенной насыщенности территории;
4. Оценка зональной техногенной нагрузки на территориальный комплекс;
5. Оценка величины социального риска путем расчета уровня превышения фактической заболеваемости над фоновой в связи с загрязненностью окружающей среды;

6. Классификация техногенных источников выбросов и предприятий по степени опасности загрязнения атмосферного воздуха на территории ТПК;

7. Модели расчета эквивалентов токсичности, приведенных концентраций и индивидуальных порогов действия загрязнителей;

8. Интегральная оценка состояния атмосферного воздуха и водных объектов на территории ТПК (расчет ИЗА и ИЗВ);

9. Оценка категории загрязненности почв и возможности их использования с учетом коэффициента опасности загрязнения;

10. Оценка уровня загрязнения почв территориального комплекса по коэффициенту концентрации загрязнителя и суммарному показателю загрязнения;

11. Методика расчета предотвращенных экологических ущербов путем пересчета примеси на монозагрязнитель;

12. Методика расчета ущерба от загрязнения, деградации земельных ресурсов ТПК;

13. Методика расчета ущерба биоресурсам;

14. Оценка величины техногенного и социального риска при эксплуатации техногенных источников повышенной опасности.

В блоке “Анализ факторов и оценка уровня техногенного, социального и экологического рисков” проводится идентификация рисков, оценивается возможность их проявления, ранжируется их актуальность и значимость для рассматриваемого периода времени и прогнозируемой ситуации, формируется текущий профиль техногенного, социального и экологического рисков техногенных объектов ТПК. Полученная новая информация сопоставляется с содержанием ранее выполненных предыдущих процедур анализа риска, а обнаруженные отклонения анализируются и интерпретируются.

Информационно-расчетная подсистема включает блок анализа и сравнения результатов с использованием стандартных моделей, методов, алгоритмов оценки техногенной безопасности и справочники для расчетов.

Роль подсистемы “Управление риском” состоит в разработке и проверке степени риска варианта решения. На основании разработанных моделей и показателей, значения которых определены при анализе риска, ставят и решают задачу о поиске адекватных мероприятий управления уровнем риска. Эта задача анализируется в блоке “Разработка управляющих воздействий мероприятия”, в котором формируется программа антирисковых мероприятий. Решение вместе с программой антирисковых мероприятий подвергается анализу и оценке уровня риска, и, в случае достижения желаемого эффекта – уменьшение уровня риска до приемлемых значений – решение, дополненное антирисковой программой рекомендуется для реализации до тех пор, пока не будет обеспечен приемлемый уровень экологического риска.

Особенности оценки профессионального риска для работников магистральных электрических сетей

Оценка профессионального риска проводится для отдельных профессиональных групп, обслуживающих магистральные электрические сети (МЭС) - работников подстанций, бригад по ремонту воздушных линий, бригад по ремонту оборудования подстанций, лабораторий, т.е. групп работников с аналогичными условиями труда.

Исходными данными для оценки коллективного профессионального риска являются результаты опроса работников о безопасности труда и определение опасностей в структурном подразделении, сбора предложений работников подразделений предприятия по улучшению условий труда, производственного технического контроля, аттестации рабочих мест по условиям труда.

Процедура оценки, анализа и управления риском основана на идентификации опасных и вредных производственных факторов, использовании результатов аттестации рабочих мест по условиям труда и метода оценки профессионального риска травмирования работников.

Целями работы по идентификации опасностей, анализу и оценке рисков являются на уровне отдельного рабочего места: информирование о существующем риске повреждения здоровья; выявление наиболее существенных рисков и планирование мероприятий по их устранению (снижению); снижение остаточных рисков и обеспечение непрерывного совершенствования в области охраны труда. На уровне МЭС целью оценки риска является выявление приоритетных направлений улучшения условий труда, обеспечивающих безопасность рабочих мест; выяснение причинно-следственной связи состояния здоровья работников с условиями труда.

Можно выделить следующие основные этапы в проведении процедуры идентификации опасностей, оценки и управления рисками:

- 1) Идентификация опасностей (ежегодно);
- 2) Предварительная оценка рисков по подразделению предприятия;
- 3) Окончательная оценка рисков по всем подразделениям предприятия;
- 4) Утверждение "Карты опасных факторов и оценки рисков" по всем подразделениям предприятия;
- 5) Ознакомление работников с картой опасных факторов и оценки рисков в подразделении предприятия и контроль за выполнением намеченных мероприятий по снижению рисков.

"Карта опасных факторов и оценки рисков" является основным документом по идентификации опасностей и оценке рисков травмиро-

вания работников, в нем по строкам фиксируются все виды опасностей, их причины, производится расчет рисков с разработкой мероприятий по их снижению. Мероприятия по устранению опасностей уменьшению рисков, указанные в “Карте опасных факторов и оценки рисков”, обязательны для выполнения в установленные сроки.

Уровень профессионального риска для персонала, задействованного в производственной деятельности в электрических сетях, оценивается следующими показателями, которые после расчета их значений пересчитываются в баллы.

Коэффициент частоты несчастных случаев $K_{\text{ч}}$:

$$K_{\text{ч}} = \frac{N_{\text{нс}} \cdot 1000}{N_{\text{сл}}}$$

где: $N_{\text{нс}}$ - число пострадавших от несчастных случаев за определенный период (месяц, квартал, полугодие, год); $N_{\text{сл}}$ - среднесписочная численность работающих предприятия за определенный период (месяц, квартал, полугодие, год).

Коэффициент частоты наступления несчастных случаев со смертельным исходом $K_{\text{чсм}}$:

$$K_{\text{чсм}} = \frac{N_{\text{см}} \cdot 1000}{N_{\text{сл}}}$$

где: $N_{\text{см}}$ - число пострадавших от несчастных случаев со смертельным исходом за определенный период (месяц, квартал, полугодие, год).

Коэффициент тяжести производственного травматизма $K_{\text{т}}$:

$$K_{\text{т}} = \frac{T_{\text{д}}}{N_{\text{нс}} - N_{\text{см}}}$$

где: $T_{\text{д}}$ - общее количество дней нетрудоспособности у всех пострадавших за определенный период (месяц, квартал, полугодие, год).

Индекс производственного травматизма $I_{\text{тр}}$:

$$I_{\text{тр}} = K_{\text{чсм}} \cdot K_{\text{тсм}} + K_{\text{ч}} \cdot K_{\text{т}}$$

В целом для предприятия показатель профессионального риска травмирования работников принимается:

- до 100 баллов - «низкий уровень риска, риск приемлемый (допустимый)»;

- от 100 до 150 баллов - «средний уровень риска», требующий разработки локальных мероприятий по снижению уровня риска в МЭС;

- свыше 150 баллов - «высокий уровень риска, риск критический», требующий разработки оперативных мероприятий по снижению уровня риска.

По МЭС показатель профессионального риска травмирования работников принимается:

- до 70 баллов - «низкий уровень риска, риск приемлемый (допустимый)»;

- от 70 до 100 баллов - «средний уровень риска», требующий разработки локальных мероприятий по снижению уровня риска по МЭС;

- свыше 100 баллов - «высокий уровень риска», требующий разработки оперативных мероприятий по снижению уровня риска по МЭС.

Процесс управления рисками содержит следующие этапы:

1) Ежегодное проведение идентификации опасностей с помощью качественного анализа рисков и условий их возникновения, количественной оценки рисков и принятых вероятностей несчастных случаев, сравнительного анализа состояния охраны труда в подразделениях и на рабочих местах, оценки динамики травматизма;

2) Реализация мероприятий по снижению уровней риска;

3) Мониторинг эффективности принимаемых решений и их корректировка, контроль выполнения плана управления рисками и перспективное планирование развития работ по охране труда на предприятии.

В качестве основных технических решений для снижения риска рассматриваются: устранение опасности (замена оборудования, отмена соответствующей операции); минимизация опасности с применением инженерных решений, мер организационного характера, коллективной защиты, СИЗ; углубленное изучение закономерностей развития опасностей для изыскания новых средств минимизации рисков.

Главными направлениями решения проблемы риска ошибочных действий персонала являются: совершенствование обучения работников безопасным методам работы и контроля качества обучения; повышение уровня профессиональной подготовки персонала всех подразделений, качества инструкций и тренажеров для выполнения работ на опасных промышленных объектах, уровня правовой ответственности за несоблюдение требований по охране труда; применение физиологических и психодиагностических методов контроля способности персонала выполнять работу в опасных условиях; создание системы психологической поддержки работника; воспитание у персонала сознательного отношения к производственным рискам и способам защиты от них; создание интерактивной информационной и правовой поддержки работающих с применением мобильных средств связи и телекоммуникации; отображение возможных опасностей на рабочих местах.

Служба охраны труда предприятия в соответствии с полученными результатами оценки риска по подразделениям формирует список оборудования, требующего замены или ремонта по условиям безопасности проведения работ; дает предложения по проведению организационных и технических мероприятий по охране труда, предложения по совершенствованию профессиональной подготовки персонала, по психофизиологической подготовке персонала к работе на потенциально опасных рабочих местах.

Обеспечение комфортности условий труда при избытках тепловыделений и влаги в воздухе рабочей зоны

При наличии в воздухе рабочей зоны паров и газов, выделяемых в производственных процессах, комфортность условий труда обеспечивается системой приточно-вытяжной вентиляции. Основные характеристики и режимы работы системы вентиляции зависят от температуры окружающей среды, выделяющейся в помещении влаги, производимой продукции, наличия пыли в воздухе и определяются в процессе проведения расчетов, особенности которых рассмотрены ниже.

Объем воздуха V_B , м³/ч, необходимый для удаления избыточной теплоты, рассчитывается по формуле:

$$V_B = \frac{3,6 \cdot Q}{(t_{вн} - t_{пн}) \cdot \lambda_v \cdot \rho_v},$$

где Q - количество выделяющейся в помещении избыточной теплоты, Вт; $t_{вн}$ и $t_{пн}$ - нормально допустимая температура воздуха в рабочем помещении и температура поступающего (наружного) воздуха, °С; λ_v - удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С; ρ_v - плотность приточного воздуха, кг/м³.

Количество поступающей в помещение избыточной теплоты Q , Вт/ч, зависит от технологии производства, от применяемого оборудования, от времени года, от условий хранения готовой продукции и от других влияющих факторов, и вычисляется как сумма:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где Q_1 - величина теплового потока от поверхностей оборудования, трубопроводов, батарей отопления и других агрегатов, Q_2 - тепловой поток от хранимой в рабочем помещении горячей продукции, Q_3 - тепловой поток от работающих электрических нагревательных и силовых устройств.

Величина теплового потока в час Q_1 , (Вт/с, кДж/ч), образующегося при выделении теплоты поверхностями оборудования, трубопроводами, батареями отопления и другими агрегатами определяется по формуле

$$Q_1 = F \cdot K \cdot (t_{пов} - t_{норм}),$$

где F - площадь тепловыделяющей поверхности, м²; K - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·ч·°С), кДж/(м²·ч·°С); $t_{пов}$ - температура тепловыделяющей поверхности, °С; $t_{норм}$ - нормально допустимая температура воздуха в рабочем помещении, °С

Тепловой поток Q_2 , (Вт/с, кДж/ч), образующийся при выделении теплоты хранимой в рабочем помещении горячей продукции определяется по формуле

$$Q_2 = M \cdot C_M \cdot (t_M - t_{норм}) \cdot \beta,$$

где M - масса нагретой продукции, хранимой в рабочем помещении, кг; C_M - теплоемкость материала хранимой продукции (усредненная теплоемкость нагретой массы продукции), Вт/кг \cdot $^{\circ}$ С; t_M - температура массы продукции по фактическому замеру, $^{\circ}$ С; $t_{норм}$ - нормально допустимая температура воздуха в рабочем помещении, $^{\circ}$ С; β - поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность остывания массы продукции.

Тепловой поток Q_3 , кВт, образующийся при выделении теплоты от работающих электрических нагревательных и силовых устройств при переходе электрической энергии в тепловую определяется по формуле:

$$Q_3 = P \cdot \eta \cdot f \cdot \varphi,$$

где P - установочная мощность электрических устройств, кВт; η - коэффициент перехода электрической энергии в тепловую; f - коэффициент использования установочной мощности электрических устройств; φ - поправочный коэффициент, учитывающий одновременность работы тепловыделяющих электрических устройств.

Окончательным результатом расчета теплового воздухоотвода является величина кратности воздухообмена N , 1/ч, определяемая как отношение объема V_B воздуха, необходимого для удаления избыточной теплоты Q , к объему рабочего помещения V_P :

$$N = \frac{V_B}{V_P},$$

Объем воздуха V_B , $m^3/ч$, необходимый для удаления паров, рассчитывается по формуле:

$$V_B = \frac{W \cdot 10^3}{(d_y - d_n) \cdot \rho_B},$$

где W - количество выделяющейся в помещении влаги, кг/ч; d_y , d_n - количество водяных паров в удаляемом из помещения воздухе и в воздухе, поступающем в помещение, г/кг; ρ_B - плотность воздуха при данной температуре, кг/ m^3 .

Количество выделяющейся в помещении влаги W зависит от условий, в которых находится рассматриваемое производственное помещение и рассчитывается по формуле

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4,$$

где W_1 - выделение влаги путем испарения с некоторой поверхности, W_2 - выделение влаги и газов через неплотности в различных соединениях оборудования, W_3 - выделение газов и паров со свободной поверхности жидкости, содержащей химические вещества, W_4 - выделение влаги от хранящейся остывающей готовой продукции.

Количество влаги W_1 , кг/ч, выделяемой путем испарения с некоторой поверхности размером F , м², рассчитывается по формуле:

$$W_1 = F \cdot (a + 0,017 \cdot v) \cdot (P_2 - P_1),$$

где F - поверхность испарения воды (зеркало испарения); a - фактор гравитационной подвижности окружающей среды; при оценочных расчетах принимается равным: при температуре воды, не превышающей 30 °С - 0,022; при температуре воды от 31 ... 40°С - 0,028; v - скорость воздуха над источником испарения, м/с; P_2 , P_1 - давление водяных паров при давлении насыщения, давление водяных паров в воздухе помещения при данной температуре, Па.

Количество влаги, пыли и газов W_2 , кг/ч, выделяемое через неплотности в различных соединениях оборудования вычисляется по формуле

$$W_2 = 10^{-2} \cdot \eta \cdot k_3 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot V_{\text{сум}} \cdot \rho,$$

где η - коэффициент, учитывающий часовые потери герметичности, k_3 - коэффициент запаса, определяющий состояние оборудования; P - рабочее давление в оборудовании, Н/м²; P_0 - давление в рабочем помещении, Н/м²; $V_{\text{сум}}$ - внутренний суммарный объем всего оборудования и коммуникаций, установленных в данном рабочем помещении, м³; ρ - плотность паров и газов, выделяющихся через уплотнения, кг/м³.

Выделение газов и паров со свободной поверхности жидкости, содержащей химические вещества. Объем газов и паров, выделяемых со свободной поверхности жидкости, содержащей химические вещества W_3 , кг/ч, рассчитывается по формуле

$$W_3 = M_m \cdot (0,000352 + 0,000786 \cdot V) \cdot \beta \cdot F,$$

где M_m - относительная молекулярная масса испаряющейся жидкости; V - скорость перемещения воздуха над поверхностью испарения, м/с; β - упругость пара жидкости, насыщающего воздух при температуре жидкости, Па; F - площадь поверхности испарения, м².

Количество влаги, выделяемое от хранящейся остывающей готовой продукции W_4 , кг/ч, вычисляется по формуле:

$$W_4 = \frac{C_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot 10^2}{T},$$

где $C_{\text{пр}}$ - суточная производительность завода, кг; σ - усушка продукции в %; T - продолжительность работы предприятия в течение суток, ч.

Литература

1. Васильев, П.П. Практикум по безопасности жизнедеятельности человека, экологии и охране труда. / П.П. Васильев. – М: Финансы и статистика, 2004. – 192 с.

Математическое описание экологических правил оптимума и лимитирующих факторов

В работе [1] предложена математическая формулировка комплексного условия безопасности. Аналогичный подход можно применить для описания экологических правил.

Формулировку правил оптимума и лимитирующих факторов [2, 3 и др.] предлагается представлять в виде логического выражения (равенства) определяющего значения результирующего экологического условия оптимальности или безопасности жизнедеятельности организма $У_{ж}$. В двузначной (аристотелевой) логике $У_{ж}$ может принимать значение "ИСТИНА" или "ЛОЖЬ".

Выражение для определения комплексного условия жизнедеятельности $У_{ж}$ представим в виде логического произведения частных (локальных) условий жизнедеятельности

$$У_{ж} = У_1 \mathbf{И} У_2 \mathbf{И} У_3 \mathbf{И} \dots \mathbf{И} У_n = \text{"ИСТИНА"}, \quad (1)$$

где $\mathbf{И}$ – знак логического произведения n условий $У_i$ жизнедеятельности; $У_i$ – i -е условие (логическая переменная), которая может принимать значение "ИСТИНА" или "ЛОЖЬ". Для i -го экологического фактора P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) условиями $У_i$ можно математически описать зону оптимума (2) и зону стресса (3):

$$У_i = P_i \geq H_{н.о\ i} \mathbf{И} P_i \leq H_{в.о\ i} \quad (2)$$

$$У_i = P_i \geq H_{н.к\ i} \mathbf{И} P_i \leq H_{в.к\ i} \mathbf{И} \mathbf{НЕ} (P_i \geq H_{н.о\ i} \mathbf{И} P_i \leq H_{в.о\ i}) \quad (3)$$

где $\mathbf{НЕ}$ – знак логического отрицания $H_{н.о\ i}$, $H_{в.о\ i}$ – нижняя и верхняя границы оптимальных значений (уровней) фактора P_i ; $H_{н.к\ i}$, $H_{в.к\ i}$ – нижняя и верхняя границы критических значений (уровней) фактора P_i , выход за которые угрожает организму гибелью. Выражение (3) включает описание зоны существования организма, ограниченной критическими значениями фактора P_i , за исключением зоны оптимума.

В выражении (1) $У_{ж} = \text{"ИСТИНА"}$, если истинны **все** условия $У_i$ ($i = 1, i = 2, = 3$ и т.д.).

Параметры P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) в общем случае должны представлять все экологические факторы (спектр толерантности): температуру, влажность, количество осадков и пищевых ресурсов, концентрации вредных и опасных веществ, параметры световой среды и др.

При истинности (1) с учетом (2) условия жизни – оптимальны, а при истинности (1) с учетом (3) организм будет испытывать стресс. Если $У_{ж}$ с учетом (3) примет значение $У_{ж} = \text{"ЛОЖЬ"}$ организму угрожает гибель. Факторы P_i в (3), для которых $У_i = \text{"ЛОЖЬ"}$ будут являться лимитирующими.

Напомним, что согласно с правилом логического умножения даже одно (лимитирующее) условие жизнедеятельности (2) или (3) $Y_1 = \text{"ЛОЖЬ"}$ сделает "ложным" результат оценки комплексного условия безопасности жизнедеятельности

$$Y_{\text{ж}} = Y_1 \text{ И } Y_2 \text{ И } \dots \text{ И } Y_n \equiv \text{"ЛОЖЬ"} \dots \text{ И } Y_n = \text{"ЛОЖЬ"}, \quad (4)$$

где \equiv – знак эквивалентности.

Закон лимитирующих факторов (закон толерантности В. Шелфорда) гласит: даже единственный фактор за пределами зоны своего оптимума приводит к стрессовому состоянию организма, а в пределе – к его гибели [2].

Отметим, что при описании условия жизнедеятельности организма или его стадии, параметры P_i должны конкретизироваться более детально.

В выражениях (2) и (3) можно учесть влияние здоровья и других свойств организма, представив их в виде совокупности параметров, значения которых можно дать качественную (балльную) оценку. Например, здоровье, быстроту реакции и др. можно оценить по пятибалльной шкале. Нижние и верхние допустимые значения $H_{н.о.и}$, $H_{в.о.и}$, $H_{н.к.и}$, $H_{в.к.и}$ в (2), (3) для этих факторов также должны задаваться баллами.

Таким образом, можно полагать, что выражениями (1) и (2) описывается правило оптимума, а выражениями (1) и (3) – правило лимитирующих факторов.

В общем случае при определении $Y_{\text{ж}}$ и Y_i следует учитывать взаимодействие факторов, которые могут усиливать или снижать действие других факторов.

Рассмотрим два способа описания взаимодействия факторов при определении условий жизнедеятельности $Y_{\text{ж}}$ и Y_i .

1. Для учета однонаправленного действия нескольких вредных веществ, загрязняющих воздушную среду, или веществ водной или почвенной среды, имеющих одинаковые лимитирующие показатели вредности, их суммарное воздействие можно заменить эквивалентным воздействием одного вещества. Приведенная концентрация этого вещества c_n определится по известной формуле путем суммирования концентраций с учетом степеней опасности этих веществ, которые характеризуются значениями предельно допустимых концентраций, ПДК,

$$c_n = c_1 + c_2 \cdot \text{ПДК}_1 / \text{ПДК}_2 + \dots + c_k \cdot \text{ПДК}_1 / \text{ПДК}_k \quad (5)$$

где k – количество веществ однонаправленного действия.

Таким способом можно описать только зону оптимума.

2. Взаимодействие экологических факторов можно учесть с помощью табличного или аналитического описания зоны оптимума. Аналитическое описание взаимодействия двух факторов p_i и p_{i+1} в виде замкнутой области, например, оптимальных значений температуры и влажности воздуха для яблоневой плодовой орехи (по Наумову Н.П., 1955, [3]), можно представить в виде области определенности (существования) аналитического выражения функции [4]

$$f_{i,i+1}(p_i, p_{i+1}) \leq 0. \quad (6)$$

Тогда условие оптимальности жизнедеятельности по двум взаимодействующим факторам $Y_{i,i+1}$ опишется логическим выражением

$$Y_{i,i+1} = f_{i,i+1}(P_i, P_{i+1}) \leq 0, \quad (7)$$

которое показывает, что параметры P_i, P_{i+1} принадлежат зоне, описанной функцией (6).

Выражения аналогичные (5)...(7) можно использовать и для математического описания зон стресса и гибели организма.

Рассмотренные описания характеризуют условия жизнедеятельности $Y_{ж}$ в определенный момент времени или стадии жизнедеятельности. При моделировании динамических процессов их можно использовать для определения вида функций, описывающих динамику биотических факторов (рождаемость, смертность, биомассу, продуктивность и др.), зависящих от условия жизнедеятельности $Y_{ж}$ организма или популяции.

Литература

1. Соколов А.К. О формализации комплексного условия безопасности// Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 2. – С. 46–48.
2. Николайкин Н.И., Николайкина Н.Е., Мелехова О.П. Экология: Учеб. для вузов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2004. – 624 с.
3. Шилов И.А. Экология: Учеб. для биол. и мед. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1997. – 512 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1967. – 608 с.

УДК 37.034+372.862+502

СОКОЛОВ А.К., д.т.н., профессор,
ПОПОВ Г.В. д.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

О некоторых воспитательных компонентах учебных курсов специальности «безопасность жизнедеятельности в техносфере»

Человеческий фактор в обеспечении безопасности труда и экологической безопасности имеет важнейшее значение, поэтому освоение учебных курсов должно дать не только знания, но и сформировать мировоззрение, основанное на любви к людям и природе. Поскольку, если у человека нет любви к людям и природе, то даже усвоенные знания он не применит правильно, благоразумно. Напротив, если человек понимает ценность человеческой жизни, то и при недостатке знаний он постарается найти решения, необходимые для сохранения жизни людей и благоприятной среды обитания для нынешних и будущих поколений людей на Земле.

Определяющей задачей изучения дисциплины "Экология", на наш взгляд, должно стать воспитание экологического сознания. Необходимость повышения экологического сознания поясняется формулой, качественно характеризующей уровень воздействия деятельности человечества на окружающую среду, УВОС,

$$УВОС = \frac{У_{чн} \times У_{ж}}{У_{зз} \times У_{уэб} \times У_{эт} \times У_{эс}},$$

где $У_{чн}$, $У_{ж}$ – уровни численности населения и жизни; $У_{зз}$, $У_{уэб}$, $У_{эт}$, $У_{эс}$ – уровни законодательной защиты, управления экологической безопасностью, экологичности технологий и экологического сознания. Увеличение параметров, находящихся в знаменателе формулы, способствует снижению УВОС.

Экологическое сознание – часть общего мировоззрения человека, которая характеризуется степенью благотворности деятельности по отношению к человеку и природе (деятельностью во благо).

На Земле и в природе все взаимосвязано, поэтому, очевидно, что угнетение природы – это прямое разрушение дома человечества, яркое проявление нелюбви к себе, к другим людям, которое ведет к гибели цивилизации. Таким образом, воспитание любви к природе неотделимо от общего воспитания добродетельной любви к людям – основной черты православного человека. Приобрести экологическое мировоззрение – значит понять, проникнуться важностью проблемы спасения человечества от экологической катастрофы и взять на себя часть забот о доме человечества. Повышение уровня экологического сознания населения, на наш взгляд, имеет первостепенное значение, поскольку именно оно инициирует все виды деятельности по обеспечению экологической безопасности (законодательные, административные, экономические, технологические).

В целях формирования экологического сознания в курсе рассказывается о сложности и совершенстве живой и неживой природы [1, 2], обосновывается неизбежность экологической катастрофы, предлагается методика оценки уровня экологического (общего) сознания (меры совестливости человека). Приводятся интересные факты показывающие "разумность природы": механизмы, обеспечивающие принципиальную возможность вечной жизни ПРИРОДЫ, саморегулирования сложных взаимоотношений в природе между организмами.

В программу курса "Научные основы школьного курса "Основы безопасности жизнедеятельности"" нами включен раздел "Формирование личности безопасного типа", то есть идеальной личности безопасной для себя и для окружающих людей. При изучении этого раздела внимание студентов обращается на следующие аспекты.

В формировании личности безопасного типа заинтересовано общество, государство и большинство людей. Каждый из нас заинтересован в том, чтобы его окружали добрые, милосердные, отзывчивые

люди. Практически все заинтересованы в воспитании личностей безопасного типа, однако число таких личностей пока еще не достаточно для того, чтобы сделать Мир более добрым, совершенным и справедливым.

Основная причина заключается в эгоистичности человека, который желает, чтобы добрее стали окружающие его люди, а он остался таким как есть. Мир состоит из отдельных личностей, поэтому совершенствование Мира надо начинать с посильной задачи – воспитания в себе любви к ближним. Имеем ли мы право требовать от других Любви к себе, не любя их? Поэтому, если мы хотим, чтобы Мир стал более совершенным, справедливым, каждый должен начать с себя. С простых проявлений любви – не желать и не делать Зла, жалеть, сострадать, прощать и т.д. Без этого вряд ли можно всерьез озаботиться (проникнуться) проблемами настоящих и будущих поколений человечества.

Анализ интеллектуальных, волевых, эмоциональных характеристик личности безопасного типа, показывает, что православный христианин, выполняющий 10 заповедей Иисуса Христа, сказанные им в Нагорной проповеди, и есть – личность безопасного типа, готовый пример для подражания.

Люди, считающие веру в Бога "опиумом народа", мракобесием и т.п., не могут или не хотят замечать главного – духовной и этической составляющей Веры. Все заповеди Православной Веры можно свести к одному простому определению "Бог есть любовь, и пребывающий в любви пребывает в Боге, и Бог в нем"(1 Иоан. 4, 16).

Вера в Бога и страх неминуемого его суда помогает христианину стать безопасной личностью, ориентированной только на добрые дела и взаимопомощь.

В курсе "Теория принятия решений" о Евангельском учении говорится при пояснении определений: свободы выбора и внешних обстоятельств, управляемых Творцом и дьяволом, действия которого ограничены Богом. Внешние обстоятельства, создаваемые Богом, зависят от предыдущих поступков человека и его предков, а точнее от их благонамеренности.

Выбор правильного решения определяется многими факторами: опытом, интуицией, советами близких, литературными примерами и др. Подчеркивается, что особенно ценными источниками мудрости для принятия жизненно важных решений следует считать: Евангелие, молитвы к Богу и святым, советы и наставления священников, которые через молитву в Храме могут получить советы от самого Бога.

В программных средствах, предназначенных для решения задач по безопасности жизнедеятельности и обучения приемам оказания первой помощи, элементы православного воспитания включаются в описательные части программ в виде цитат из Библии.

Описанные примеры проповедования нравственных основ личности безопасного типа, хорошо вписываются в предметную область

учебных курсов и позволяют ненавязчиво говорить о Боге и православной вере. Безусловно, что надо работать над тем, чтобы подобных примеров было больше.

Литература

1. Соколов, А.К. О совершенстве живой природы. / А.К. Соколов // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Сб. науч. трудов. Междунар. науч.-техн. конф. XVI Бенардосовские чтения. Том 1: Иваново, 2011. – С. 285-287..
2. Соколов, А.К. О совершенстве неживой природы / А.К. Соколов // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Сб. науч. трудов. Междунар. науч.-техн. конф. XVI Бенардосовские чтения. Том 1: Иваново, 2011. – С. 283-284.

УДК 614.8.084:001

К.В. ЧЕРНОВ к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

О понятиях информации и сциенции в методологии безопасности

Понятие информации объективно является когнитивным понятием, но относится к поверхностным, «верхушечным», так как крайне слабо обусловлено имплеонизмами познания. Имплеонизм (*лат. impleo – наполняю*) представляет собой способ и последовательность исполнения чего-либо, мышления, в ординарном значении – механизм, но термин «механизм познания» – вульгаризм.

«Длительное время в науке существовала загадочная неопределенность и неоднозначность в интерпретации понятия "информация". С одной стороны, крепла уверенность в том, что информация играет огромную роль в природе и человеческом обществе. С другой стороны, нельзя было не видеть, что попытки научного определения явления информации не имели успеха. Это наиболее ярко проявилось в сентенции создателя кибернетики Н. Винера, утверждавшего: "информация есть информация, а не материя и не энергия". Ясно, что отрицание не может претендовать на роль определения, вместе с тем в данном случае оно существенно, ибо указывает на отсутствие субстанционального (вещественного и полевого) происхождения информации» [1].

«Никто ещё не видел ни как субстанциию, ни как свойство эту загадочную информацию. Везде мы обнаруживаем лишь воздействие материальных веществ, наделенных энергией, и нигде не обнаруживаем того, что обычно называют информацией. Почему? Да потому, что её не существует в природе, как не существует флюидов, флогистона, эфира» [2].

«Сейчас имеется несколько (даже много) определений понятия "информация" и ни одно из них не является общепринятым» [3].

Понятие информации в наиболее часто употребляемом значении определяется как «сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления» [4]. В книгах [1,3] приводится много определенных «информации», укажем лишь те, которые признаны авторами наиболее подходящими:

1) «Действительно, поиски информации в качестве субстанции или функции состояния бесперспективны. Информация вполне реальна, объективна, как процесс». И далее – «Феномен информации есть многостадийный, необратимый процесс становления структуры в открытой неравновесной системе, начинающийся со случайного запоминаемого выбора, который эта система делает переходя от хаоса к порядку и завершающийся целенаправленным действием согласно алгоритму или программе, отвечающим семантике выбора» [1].

2) «Выбор определения зависит от аппарата исследования, иными словами, определение должно быть конструктивным, то есть пригодным для использования в рамках аппарата. Мы будем использовать аппарат теории динамических систем, поскольку именно он лежит в основе науки о самоорганизации (то есть синергетики). Этим условиям в наибольшей степени удовлетворяет определение информации, предложенное Генри Кастлером. – Информация есть случайный и запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных» [3].

«Даже краткий обзор предпринимаемых различными исследователями попыток дать общее содержательное истолкование понятия информации показывает безрезультативность предпринимаемых в этой области усилий. По-видимому, здесь мы встречаемся с тем парадоксальным случаем, когда экспликация термина оказывается невозможной в силу малоизученности круга соответствующих ему явлений. Эта ситуация будет, очевидно, преодолена лишь после того, как данные, полученные наукой, достигнут некоторой "критической массы", будут обнаружены неизвестные в настоящее время закономерности и прояснятся системы связей между отдельными аспектами общей проблемы. Пока же, по-видимому, допустимо прибегать к такому определению информации, которое операционно удобно для данного типа исследований» [1].

Понятие, более глубокое, чем «информация» и отображающее субстанциальное содержание реальности, – это понятие сциенции.

Категория субстанции при интерпретации естественнонаучного мировоззрения является производной от категории реальности. Субстанция наполняет собой формообразования реальности и их внешнее окружение. В системологии отображением биотической субстанции формообразований живой составляющей реальности, их частей и их субстанциального взаимовлияния и влияния становится триединое вещественное, энергетическое, сциентное содержимое биотических компонентов и отношений этих компонентов. Сциенция представляет собой отображающую субстанцию живой составляющей реальности

осознаваемую при кодовой рефлексии неотделяемую часть содержимого биотического компонента переходной и высших ступеней сопринадлежности, которая, имея главным проявлением знак вещественно-энергетического состава, придаёт ему (биотическому компоненту) организованность, поддерживаемую преобразованием совокупностей знаков при их создании, восприятии, передаче, хранении, воспроизведении, применении в поведении и деятельности в соответствии с имплеонизмами кодовой рефлексии.

Знак в системнологической семантеме сциенции является отправным понятием. «Знак», в соответствии с философским словарём [5], представляют собой «материальный чувственно воспринимаемый предмет, событие или действие, выступающее в познании в качестве указания, обозначения или представителя другого предмета, события действия, субъективного образования». «Чрезвычайно существенна связь знака с процессом передачи информации» [5]. «В информационных процессах знаки выступают в качестве элементарных носителей информации ...» [6].

Вещественно-энергетическое содержание знаков обуславливает их активность, которая заключается в том, что они, созданные биотическим веществом и биотической энергией, в совокупности с другими вызывают и сопровождают сциентное взаимодействие биотических компонентов. Сциенция выражается не одним вещественно-энергетическим знаком и не их произвольным набором, а взаимодополняющей совокупностью знаков.

Часть реальности, которой при кодовой (*лат. caudex – дощечка для записи*) рефлексии (*лат. reflexus – отражение*) приводится в соответствие совокупность знаков, называется в семиотике [6] десигнатом (*лат. designatio – обозначение*).

Сциенция предстаёт десигнатными совокупностями вещественно-энергетических знаков, которые представляются структурными особенностями вещества и проявлениями свойств энергии. Но сциенция выражается не только десигнатными совокупностями вещественно-энергетических знаков, но и активностями этих знаков.

Активность десигнатного вещественно-энергетического знака сциенции обеспечивается теми веществом и энергией, посредством которых он создан. Доминирование вещественных или энергетических свойств в сциентном знаке предстаёт вещественной или энергетической активностью. Вещественная активность сциентного знака сциенции обусловлена типом вещества, его структурой, а энергетическая – разнородностью энергии, обусловленной структурой.

Понятие сциенции при выражении её только десигнатными совокупностями знаков вырождается в информацию. Лингвистическая практика использования этого понятия такова, что для информации не важны и не значимы вещественно-энергетический состав знаков и их ак-

тивность. При его определении доминирующими факторами становятся дискурс (*фр. discours – речь*) и контекст (*лат. contextus – соединение*).

Информация в методологии безопасности – это совокупности хранимых, передаваемых, преобразуемых и распознаваемых знаков.

Литература

1. Мелик-Гайказян И.В., Мелик-Гайказян М.В., Тарасенко В.Ф. Методология моделирования нелинейной динамики сложных систем. – М.: Физматлит. – 2001.
2. Соколов А.В. Информация: феномен? функция? фикция? // Философские науки. – 1990. – №9. – С. 13-22.
3. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. – М.: Книжный дом «Либроком». – 2009.
4. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», №149-ФЗ, от 27.07.06 / [Электронный ресурс]: сайт компании «Консультант Плюс». – Режим доступа <http://www.consultant.ru>.
5. Философский словарь / Под. ред. И.Т. Фролова. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Республика, 2001.
6. Мечковская Н.Б. Семиотика Язык. Природа. Культура. – М.: Академия, 2007.

УДК 614.8.084:001

К.В. ЧЕРНОВ к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

О критериях когнитивной адекватности безопасной деятельности

Всякий критерий представляет собой признак, на основании которого производится оценка чего-либо. Критерием когнитивной адекватности является признак, на основании которого проводится оценка тождественности познанного и познаваемого.

Наука, научное знание, существует наряду с мифологическим, религиозным, философским, художническим и обыденным знаниями. Мифологическое знание есть первоначальное знание, формируемое под влиянием трансцендентной составляющей реальности. Религиозное знание также обусловлено трансцендентной составляющей и акцентируется на вере, а не доказательствах. Философское знание как обобщение мировоззрения направляется антропным опытом, оно в значительной мере умозрительно, спекулятивно. Художническое знание обуславливает деятельность в области искусства и не нуждается в обоснованности. Обыденное знание, или знание здравого смысла, эклектично, оно представляет собой «смесь» мифологического, религиозного, философского, художнического и научного знания. Зачастую научное знание в таком сочетании становится квазинаучным, проявляющемся в алхимии, астрологии, паранауках и т.п. Главные особенности научного знания – однозначность, воспроизводимость, воплощаемость.

Научное, а также ненаучное знание разделяется на теоретическое и прикладное. Теоретическое знание есть знание о свойствах и закономерностях реальности, которыми она проявляется или наделяется. Прикладное знание возникает при освоении познаваемой реальности с преобразованием её в артеантропную, стимулируемое удовлетворением потребностей. В антропном знании кроме теоретико-прикладного присутствует практическое знание, или умение, обуславливающее содержание конкретных действий каждого человека.

Биогенез проявляется в человеке анатомически и сциентно. На современной стадии эволюции главное направление антропогенеза – это сциентное совершенствование. Мерой сциентности человека служит приобретённое и применяемое теоретическое, прикладное и практическое знание. Правильность и полезность знания испытывается деятельностью.

Эволюция антропной составляющей реальности продолжается и поддерживается эволюцией, в основном, техноантропной составляющей. Она создаётся в результате перевоплощения и материализации высших форм антропного знания. Техноэволюция повторяет антропогенез и биогенез на следующей стадии развития.

Технетический антропогенез, или техногенез, представляет собой эволюцию знания человека и сообществ людей в области создания, применения и совершенствования устройств и сооружений, которые увеличивают адаптационные и преобразующие способности. Техногенез сопровождается и поддерживается специфической разновидностью антропогенной деятельности, называемой техногенной.

Техногенная деятельность разделяется на следующие виды: проектно-конструкторская, проектно-изыскательская, строительно-монтажная, пуско-наладочная, эксплуатационная, экспертно-декларационная, испытательная, ремонтная, утилизационная и иная деятельность. Техногенная деятельность совпадает частично с научной, а в остальном она обусловлена этой деятельностью.

Каждый вид техногенной деятельности должен исполняться работниками, имеющими необходимую квалификацию, в соответствии с технологией, которая представляет собой обязательную для исполнения совокупность показателей, согласующих работу устройств, свойства преобразуемых материалов, потребляемой энергии, необходимые действия работников с предъявляемыми к продукции требованиями.

Техногенная безопасность должна быть неотъемлемой частью всех видов деятельности. Готовность работника к безопасному осуществлению её конкретной разновидности должна оцениваться посредством критериев когнитивной адекватности.

Критерии когнитивной адекватности безопасной деятельности и правила их составления должны вырабатываться с помощью психологического метода, интенцией (*лат. intentio – направление, намерение*) которого является адекватность антропного познания.

Требования к установлению показателей (но не критериев) когнитивной адекватности работников сформулированы в федеральном законе «Трудовой кодекс Российской Федерации». В статье 143 [1] приводится следующее. «Тарифный разряд – величина, отражающая сложность труда и уровень квалификации работника. Квалификационный разряд – величина, отражающая уровень профессиональной подготовки работника. Тарификация работ – отнесение видов труда к тарифным разрядам или квалификационным категориям в зависимости от сложности труда. Сложность выполняемых работ определяется на основе их тарификации. Тарификация работ и присвоение тарифных разрядов работникам производятся с учетом единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих (ЕТКС), единого квалификационного справочника должностей руководителей, специалистов и служащих или с учетом профессиональных стандартов».

Некоторые показатели когнитивной адекватности работников приведены в ЕТКС [2] и имеют следующее содержание. Например, машинист компрессорных установок 4 разряда должен знать: «конструктивные особенности, устройство различных типов компрессоров, турбокомпрессоров, двигателей внутреннего сгорания, паровых машин, паровых турбин и электродвигателей, вспомогательных механизмов, сложных контрольно-измерительных приборов, аппаратов и арматуры; схемы расположения паропроводов, циркуляционных конденсационных трубопроводов, арматуры и резервуаров компрессорной станции; схемы расположения автоматических устройств для регулирования работы и блокировки оборудования; основные технические характеристики обслуживаемых компрессоров; нормы расхода электроэнергии и эксплуатационных материалов на выработку сжатого воздуха или газов».

Он должен уметь «обслуживать стационарные компрессоры и турбокомпрессоры давлением до 1 МПа, с подачей свыше 100 до 500 м³/мин или давлением свыше 1 МПа, с подачей свыше 5 до 100 м³/мин каждый при работе на неопасных газах с приводом от различных двигателей; обслуживать стационарные компрессоры и турбокомпрессоры, работающие на опасных газах давлением до 1 МПа, с подачей свыше 5 до 100 м³/мин или давлением свыше 1 МПа, с подачей до 5 м³/мин каждый; устанавливать и поддерживать наивыгоднейший режим работы компрессоров; наблюдать за исправностью двигателей, компрессоров, приборов, вспомогательных механизмов и другого оборудования; осматривать и ремонтировать оборудование компрессорных установок в пределах квалификации слесаря 3 разряда». На основании требований ЕТКС составляется должностная инструкция, в которой перечень требований к знаниям и умениям уточняется и конкретизируется.

Незнание и неумение или ошибочное выполнение того, что указано в должностной инструкции может приводить к возникновению техногенных опасностей. В соответствии с «Трудовым кодексом РФ» работодатель обязан обеспечить: «обучение безопасным методам и приемам выполнения работ и оказанию первой помощи пострадавшим

на производстве, проведение инструктажа по охране труда, стажировки на рабочем месте и проверки знания требований охраны труда» [1].

Обучение безопасным методам и приемам выполнения работ и проверки знания технологии и требований охраны труда должны проводиться на основе критериев когнитивной адекватности безопасной деятельности. Каждый критерий, формулируемый посредством сциологического метода исследования проблемы антропогенной безопасности, предстаёт объективным тезисом, который работник должен аргументированно доказывать. Испытание конкретного работника на соответствие критериям когнитивной адекватности безопасной деятельности при выполнении им этой деятельности должна стать мерой, уменьшающей негативные последствия влияния «человеческого фактора».

Литература

1. **Федеральный закон** «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 29.12.2012) / [Электронный ресурс]: сайт компании «Консультант Плюс». – Режим доступа <http://www.consultant.ru>.
2. **Постановление** Госкомтруда «Единый тарифно-квалификационный справочник работ и профессий рабочих. Профессии рабочих, общие для всех отраслей народного хозяйства» / [Электронный ресурс]: сайт компании «Консультант Плюс». – Режим доступа <http://www.consultant.ru>.

УДК 661.16:502

Д.С. ШАРОВА, студентка,
И.Г. МЕЛЬЦАЕВ, д. с.-х. н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

Воздействие пестицидов на биосферу

В последние годы по разным оценкам в мире насчитывается более чем 1000 химических соединений, на основе которых выпускают многие тысячи препаративных форм пестицидов. Производимые пестициды подразделяются по стойкости в окружающей среде и способности к биоаккумуляции. Наиболее стойкими и одновременно обладающими четко выраженными свойствами являются хлорорганические пестициды, для которых характерно их накапливание в последующих пищевых цепях. По устойчивости к разложению в почве пестициды делят на очень стойкие (время разложения на нетоксичные компоненты составляет свыше 2 лет), умеренно стойкие (до 6 месяцев), малостойкие (до 1 месяца).

Заболеваемость при работе с пестицидами в 2-3 раза превышает общий уровень заболеваемости в агропромышленном комплексе. На отрасль растениеводства приходится примерно около 70 % всех отравлений. Болезни с профессиональной патологией в РФ стала одной из самых высоких в мире, количество инвалидов труда превышает 1 млн

чел. За последние годы удельный вес работающих во вредных и опасных условиях труда возрос с 18 % до 22 % это несмотря на спад производства. По расчетам, сделанным В.А. Захаренко, с 1986 г по 1990 г, потери урожая в РФ составляли (в ценах 1983 г) в среднем около 7,66 млрд. руб. в год. Как пишут М.С. Соколов [и др.] (1994), что потери урожая в Российской Федерации достигают ежегодно примерно 71,0 млн. т. зерна. Увеличение продукции за последние десятилетия достигнуто исключительно за счет применения химических средств защиты растений.

Американскими учеными подсчитано, что если прекратить применение средств защиты растений, то для поддержания валового сбора зерна на таком же уровне потребуется дополнительно вводить под посев около 52 млн га естественных угодий. При этом стоимость производимой продукции повысится на 50-70 %. От общего количества мирового производимых пестицидных препаратов Канада и США использовали примерно 33,0 %, страны Европы – 25,0 %, Юго-восточной Азии -22,0 %. Страны Восточной Европы (включая РФ)- 10,0 %, Латинской Америки – 9,0%, Австралия и Новая Зеландия – 1,0 %. На 1 га посевов в Италии использовали 21 кг химических средств защиты растений, в Японии – около 16, в других развитых странах Западной Европы - в среднем 2-3, в республиках СНГ – от 0,6 до 13,2 кг/га. К сожалению, несмотря на все выгоды, получаемые при использовании пестицидов, постепенно стали проявляться сопутствующие неблагоприятные факторы. Это вызвано необычайной токсичностью данных веществ, и наиболее значимые отрицательные факторы, связаны с опасными экологическими последствиями применения пестицидов. Пестицид, каким бы он не был, неизбежно вызывает глубокие изменения всей экосистемы, в которую его внедрило. Исходя из этих положений и экономической сообразности, во всех странах мира промышленное производство пестицидов увеличивается и к настоящему времени уже достигло десятков миллионов тонн в год. По природе и химической структуре пестициды подразделяют на хлорорганические препараты — хлорированные углеводороды (ДДТ, гексахлоран, ДДТ-2,4-Д, 1-гетаклор и т.д.), фосфорорганические препараты (метафос, хлорофос, карбофос, тиофос и другие.), ртутьорганические соединения (гранозан, меркуран и прочие.), карбаматы — соединения карбаминовой кислоты (севин, цинеб, цирам) и прочие органические и неорганические химические соединения. Токсичность пестицидов для человека неодинакова и зависит от многих причин. Особую опасность представляют пестициды, характеризующиеся высокой устойчивостью в окружающей среде, с выраженными кумулятивными свойствами и способностью выделяться с молоком лактирующих животных и с молоком кормящих матерей. К этой группе ядохимикатов относятся хлорорганические пестициды (гексахлоран, полихлорпинен, лигдан и др.). Например, гексахлоран в почве может сохраняться в течение 11 лет. Наиболее приемлемы пестициды, которые под воздействием факторов внешней среды сравнительно быстро расщепляются на безвредные компоненты. В настоящее время в сельском хозяйстве широко используются фосфорорганические вещества, обладающие меньшей устойчивостью к

факторам внешней среды. Большинство из них разлагается в растениях, почве и в воде в течение одного месяца. Поэтому пестициды этой группы значительно реже выявляются в продуктах питания, так как разрушаются при кулинарной обработке.

Неблагоприятное влияние пестицидов на организм человека проявляется в виде острого и хронического отравления. Острое отравление чаще возникает при грубых нарушениях правил применения пестицидов и правил использования пищевых продуктов, обработанных ими. Хронические отравления возникают в результате длительного употребления пищевых продуктов, содержащих пестициды, в дозах, незначительно превышающих предельно допустимые концентрации. Проявление хронических отравлений наиболее часто сопровождается заболеваниями органов пищеварения (печени, желудка), сердечно-сосудистой системы. В основе механизма токсического действия большинства фосфорорганических соединений лежит угнетение холинэстеразы, сопровождающееся накоплением в крови и тканях ацетилхолина. Пестициды могут приводить к образованию в организме злокачественных опухолей у человека, влиять на обменные процессы в растениях, что сказывается на химическом составе и пищевой ценности продукции. Действие пестицида никогда не бывает однозначным, что вытекает из совокупности экологических свойств, присущих всем пестицидам:

- в большинстве случаев пестициды имеют широкий спектр токсического воздействия, как на виды растений, так и виды животных;

- пестициды очень токсичны для теплокровных, позвоночных и пойкилотермных организмов и самого человека; пестициды всегда применяются против каких-то популяций; многие из этих веществ могут сохраняться в окружающей среде десятки лет. Вносимые пестициды распространяются за пределы тех агроэкосистем, где они применяются. Даже в случае использования наименее летучих компонентов более 50 % активных веществ в момент воздействия переходят напрямую в атмосферу [1]. Проблема применения пестицидов связана с двумя основными опасностями. Первая опасность заключается в том, что люди при их применении могут подвергаться непосредственному воздействию больших их концентраций, что может привести в определенных ситуациях к острым поражениям организма. Вторая проблема - это профилактики здоровья при воздействии пестицидов малых уровней, с которыми наиболее часто приходится контактировать в процессе применения. При хронической интоксикации пестицидами в организме человека нарушается углеводный обмен в сердечной мышце, снижается уровень гликогена на фоне повышения активности гексакиназы и фосфорлиазы. Роль пестицидов в развитии патологии нервной системы в настоящее время не вызывает сомнений. Они вызывают токсичное повреждение нервной системы, характеризующееся дегенеративно-дистрофическими и сосудистыми изменениями. Психопатологическая симптоматика может включать депрессию, шизофренический синдром, чувство страха и раздражительности. У лиц, работающих с пестицида-

ми, наблюдается изменения органа зрения. При острых отравлениях пестицидами отмечаются поражения глаз, гипотонии, сужении поля зрения и т.д. Среди работающих с пестицидами чаще встречаются заболевания печени, желчных путей и оказывают токсичное действие на желудочно-кишечный тракт. Обследования работников связанных с пестицидами выявлены заболевания желудочно-кишечного тракта, язвенная болезнь желудка, двенадцатиперстной кишки. Изучение функционального состояния половых желез у больных с хронической интоксикацией пестицидами показало, что многие больные предъявляют жалобы на дисфункцию гонад, в частности, на снижение потенции и импотенцию и бесплодие. В настоящее время почти 200 видов пестицидов обладают мутагенными свойствами, что отражается не только на работающем с ними человека, но и на его потомстве. Достоверно установлено, что прямой контакт работающих с пестицидами увеличивает частоту повреждения хромосом в соматических клетках, бесконтрольное использование пестицидов представляет значительную генетическую опасность.

Литература

1. Лунёв, М.И. Пестициды и охрана агроландшафтов /М.И. Лунёв.– М.: Колос, 1992.

УДК 681.7

Р.И. КАЛИМУЛЛИН, д. ф.-м. н., профессор
И.Р. ИСМАГИЛОВ, аспирант
А.А. ХАСАНОВ, аспирант
КГЭУ, г. Казань

Лазерно-акустическая диагностика тонкопленочных металлических покрытий полупроводников и диэлектриков

В большинстве современных изделий электронной техники, электротехники и энергетики используются тонкопленочные металлизированные покрытия полупроводников и диэлектриков. Они применяются для защиты металлов от коррозии, а также с целью использования скин-эффекта. Кроме того, металлические плёнки широко распространены в микроэлектронике в качестве межэлементных соединений, контактных площадок, обкладок конденсаторов, магнитных и резистивных элементов интегральных схем. В связи с этим все большую актуальность приобретает дефектоскопия тонких металлических пленок. Сложная конфигурация и малая толщина пленочных покрытий затрудняют применение традиционных методов неразрушающего контроля. Одним из наиболее перспективных, но менее изученным среди множества методов ультразвуковой дефектоскопии является метод лазерно-акустического контроля. Прикладная ценность данного способа диагно-

стики заключается в том, что он позволяет бесконтактно генерировать ультразвуковые волны (УВ) в объекте контроля (ОК) в результате опто-термического эффекта. В работе [1] также представлен способ бесконтактного детектирования поверхностных акустических волн.

Целью работы является разработка методики бесконтактного обнаружения и определения местонахождения поверхностных дефектов в металлизированных покрытиях полупроводников и диэлектриков методом лазерно-акустического контроля.

В качестве ОК использовались тонкие металлические покрытия на диэлектрической подложке. Покрытия представляли собой алюминиевые пленки толщиной 0,5 и 3 мкм, полученные с помощью вакуумного магнетронного напыления. В роли подложек выступали пластины из силикатного стекла толщиной 5 мм. Генерация и детектирование акустических волн в ОК осуществлялись с помощью экспериментальной установки, подробно описанной в работе [2]. Добавим лишь, что в данном случае интенсивность лазерного пучка была уменьшена светофильтрами до уровня, исключающего возможность повреждения тонкого алюминиевого покрытия, но достаточного для возбуждения в нем акустических волн.

На начальном этапе исследований были проведены эксперименты по возбуждению и детектированию объемных (ОАВ) и поверхностных акустических волн (ПАВ) в бездефектных металлических покрытиях. Исследование поверхности тонких пленок происходило с помощью перемещения лазерного луча с шагом 10 мкм по направлению к неподвижно закрепленному пьезоэлектрическому преобразователю (ПЭП). Затем на исследуемых покрытиях был искусственно нанесен дефект в виде прорези шириной 100 мкм, и проведены повторные эксперименты с прохождением через поверхностный дефект. На рис. 1 представлена схема эксперимента в случае пленки с дефектом.

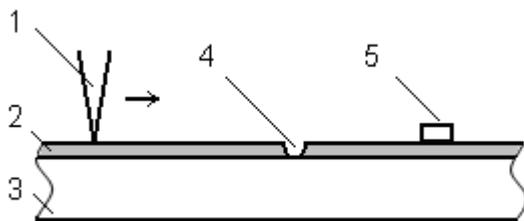


Рис.1. Схема эксперимента в случае пленки с дефектом:

1 – лазерный пучок, 2 – металлическая пленка, 3 – диэлектрическая подложка (стекло), 4 – дефект пленки, 5 - ПЭП

В результате сравнительного анализа временных диаграмм акустических сигналов для бездефектного покрытия и покрытия с дефектом (рис. 2) были выявлены следующие особенности.

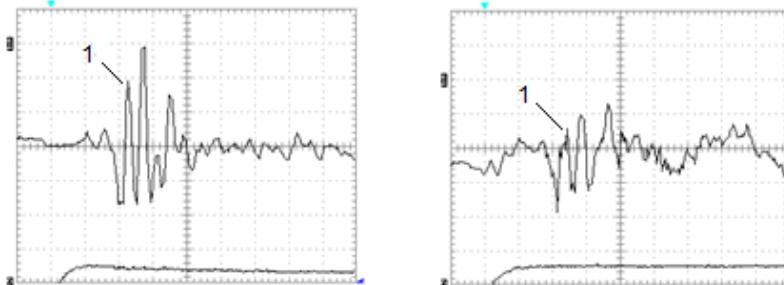


Рис. 2. Временные диаграммы акустических сигналов УВ, распространяющихся в покрытиях без дефекта (а) и при попадании сфокусированного лазерного пучка на дефект (б), 1 – волна Рэлея

При попадании сфокусированного лазерного пучка на дефект на временных диаграммах появлялся высокочастотный шум акустического сигнала, свидетельствующий о наличии дефекта на поверхности металлической пленки. После того как лазерный пучок пересек вторую границу дефекта, наблюдалось равномерное затухание амплитуды ПАВ.

В случае покрытия без дефектов по мере приближения области генерации УВ к детектору амплитуда ПАВ равномерно возрастала. При исследовании пленок с дефектом, когда область генерации УВ приближалась вплотную к границам дефекта, было замечено резкое затухание амплитуды ПАВ (рис. 3).

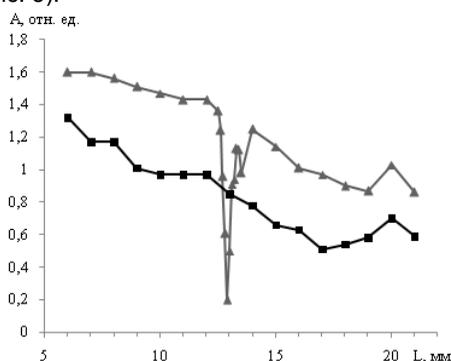


Рис.3. Зависимость интенсивности волны Рэлея от расстояния L между источником и детектором ультразвуковых волн: ■ – в пленке без дефекта, ▲ – в пленке с дефектом

Таким образом, продемонстрирована возможность обнаружения и определения местонахождения поверхностных дефектов на металлизированных покрытиях диэлектриков на основе лазерной генерации и детектирования рэлеевских волн ПЭП.

Литература.

1. Устройство бесконтактной лазерно-акустической диагностики поверхностей твердых материалов посредством генерации объемных и рэлеевских волн / И.Р. Исмагилов, А.А. Хасанов // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань, 2012. – Т. 1. – С. 216.
2. Разработка метода неразрушающей ультразвуковой дефектоскопии посредством лазерной генерации объемных и поверхностных акустических волн / Р.И. Калимуллин, С.А. Мигачев, А.А. Хасанов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 9-10. – С. 92-97.

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А		Е	
АБДУЛЛАЗЯНОВ Р.Э.	238	ЕВСИН С.И.	94
АБДУЛЛИН Л.И.	238	ЕГИАЗАРЯН А.С.	18
АВДЮНИН Е.Г.	277	ЕРУШИН В.П.	247
АЛЕЙНИКОВ А.В.	31	Ж	
АЛЬ-ХОМИДИ М.С.	190	ЖАВОРОНКОВ А.Е.	52
АНАНЬЕВ С.С.	37	ЖЕВАЕВ М.С.	21, 24
АНДРЕЕВ Д.А.	213, 225	З	
АНДРЕЕВА М.А.,	256	ЗАЙЦЕВ Е.С.	134
АНТОНОВ И.Н.	46	ЗАКУРИНА Е.Л.	265
АРХАНГЕЛЬСКИЙ Ю.С.	15	ЗИМИН Л.С.	3, 18
Б		И	
БАЙКИН А.В.	3	ИВАНОВ И.Е.	175
БАЛДОВ С.В.	122, 125	ИВКИНА Т.А.	295
БЕЛОНОГОВ В.Г.	37	ИЛЬЧИЧЕВ Н.Б.	237
БЕЛЯЕВ Г.В.	85	ИСМАГИЛОВ И.Р.	312
БОЗРИКОВ А.В.	46		
БРАТОЛЮБОВ А.А.	202		
В		К	
ВАГАПОВ Г.В.	238	КАЛАЧЕВА О.Н.	215, 219
ВАЛИУЛЛИН К.Р.	184	КАНАФЕЕВ Р.И.	21, 24
ВЕДЕРНИКОВ А.С.	161	КАНДАЛОВ Ю.В.	130
ВЕРМАХОВСКИЙ А.Н.	237	КАПУСТИН С.Ю.	267
ВИНОГРАДОВА Л.В.	259	КАРАЧЁВ В.Д.	34, 37
ВИНОКУРОВА Т.Ю.	137	КАРВАЛЬЮ НАДИР КАРИНА	
ВИХАРЕВ А.В.	82, 85	НЕТО АФРИКАНУ ДЕ	101, 110, 107
ВОРОБЬЕВ В.Ф.	63, 67, 82, 91		114
ВОРОБЬЕВ С.В.	63, 67	КАШАЕВ Р.С.	28
ВОРОШИН Д.А.	260	КВАШНИНА Г.В.	240
ВУКОЛОВ В.Ю.	147	КИРЖАЦКИХ М.Н.	164
ВЬЮНОВ М.В.	210	КИРИЛЕНКО А.В.	114
Г		КОЖЕВНИКОВ В.Ю.	60
ГАЛИМОВА А.А.	156, 244	КОЗЛОВ В.К.	242
ГОЛУБЕВ А.Н.	31, 34, 37	КОЛОБАНОВ П.А.	144
ГОЛЬДШТЕЙН В.Г.	253	КОНСТАНТИНОВА С.А.	82
ГОРБУНОВ А.Г.	261	КОПЫРЮЛИН П.В.	253
ГОРЯЧКИН С.Н.	67	КОРОЛЁВ А.Н.	12
ГРАЧЕВА Е.И.	250	КОРПИН М.М.	247
ГРЕЧИН В.П.	210	КОСТИНСКИЙ С.С.	150
ГРИШИНА Е.М.	15	КОТЕНЕВ А.В.	50
ГУСЕЙНОВА А.А.	262	КОТЕНЕВ В.И.	50
ГУСЕНКОВ А.В.	63, 67, 98, 101, 102, 105, 112	КРИВИХИН И.Н.	161
Д		КУЗЬМИНА Ю.В.	270
ДАНИЛУШКИН А.И.	6, 9	КУЗЬМИНА Е.В.	167
ДИХОР Д.В.	60	КУЛЕШОВ А.И.	194
ДОБРЮЛЮБОВА Е.А.	60	КУЛИКОВ А.Л.	144, 153, 187
ДОЛГИХ И.Ю.	12	КУЛИКОВ К.В.	26
		КУМАЧЕВА Ю.В.,	273
		КУРЗИН Ю.Е.	276
		КАЛИМУЛЛИН Р.И.	312

Л		С	
ЛАПШИН В.М.	222	САЙКИН М.С.	40, 43
ЛЕБЕДЕВ В.Д.	12, 98, 101, 102, 105, 112, 134, 170, 173, 175	САМОХИН П.В.	167
ЛИТВИНОВ С.Н.	228, 231, 234	СКОРОБОГАТОВ А.А.	228, 231, 234
М		СЛОВЕСНЫЙ С.А.	88
МАЛЮШИЦКИЙ П.Г.	210	СЛЫШАЛОВ В.К.	130
МАРКОВ М.Г.	56	СМАКОВА Л.И.	242
МАРТИРОСЯН А.А.	194	СОКОЛОВ А.К.	277, 298, 300
МАРТЫНОВ В.А.	31, 34, 37	СОКОЛОВ А.М.	98, 101, 102, 105, 107, 110 112, 114
МАСИАБ А.Г.Н.	28	СОРОКИН А.Ф.	63
МЕЛЬНИКОВА О.С.	70, 73, 76	СТЕПАНОВ Д.А.	280
МЕЛЬЦАЕВ И.Г.	256, 262, 270, 273, 309	СТРАХОВ А.С.	219, 231, 234
МИТРОФАНОВ С.В.	52, 184	СТРОЕВ В.П.	265
МИТЬКИН Ю.А.	70, 73, 79, 105, 110, 112, 114	СУХОВ Д.А.	56
МОРОЗОВА Д.Ю.	40	Т	
МОСКВИН И.А.	207	ТАДЖИБАЕВ А.И.	225
МОСТОВОЙ А.П.	9	ТАЙМОЛКИН А.Ю.	6
МУРЗИН А.Ю.	194	ТАНАЕВ А.В.	21, 24
МУРЗИНА Е.А.	178	ТАТАРНИКОВ А.Н.	50
МЯКИШЕВ В.М.	21, 24	ТИМОФЕЕВ И.П.	247
Н		ТИХОВ М.Е.	63, 67
НАЗАРЫЧЕВ А.Н.	213, 225, 231	ТИХОНОВ А.И.	282
НАЧАТОЙ Э.Л.	79	ТОКАРЕВ С.Ю.	175
НЕКРАСОВА Т.Н.	181	ТЮЛЕНЕВ И.С.	282
НОВИКОВА С.С.	43	У	
НОВОСЁЛОВ Е.М.	228, 231, 234	УКАНЕЕВА Е.Р.	164
О		Ф	
ОБАЛИН М.Д.	153	ФАЛЬШИНА В.А.	187
ОВСЯННИКОВ М.Ю.	277	ФЕДОРОВА М.Ю.	167
ОВСЯННИКОВ Ю.М.,	259	ФИЛАТОВА Г.А.	140
ОГОРЕЛЬШЕВ Н.А.	202	Х	
ОШКИН А.Я.	9	ХАРЬКОВСКИЙ В.Б.	94
П		ХОХЛОВ Ю.И.	167
ПИМЕНОВ Д.Н.,	6	ХАСАНОВ А.А.	312
ПИТЕРСКАЯ Д.А.	292	Ч	
ПОЛКОШНИКОВ Д.А.	120	ЧЕКАН Г.В.	118
ПОПОВ Г.В.	280, 282, 300	ЧЕРНОВ К.В.	303, 306
ПРУСАКОВ М.В.	85	Ш	
ПУТОВА Т.Е.	210	ШАГИДУЛЛИН А.В.	250
ПЫШНЕНКО Е.А.	286, 289, 292, 295	ШАДРИКОВ Т.Е.	91
Р		ШАРОВА Д.С.	309
РАССКАЗЧИКОВ А.В.	215, 219	ШИШКОВ Е.М.	161
РОМАНИШИН С.И.	280	ШЛЕЙНИКОВ В.Б.	159
РЫБАКОВА А.В.	250	ШУЛЬПИН А.А.	120, 122, 125
		Я	
		ЯБЛОКОВ А.А.	170

СОДЕРЖАНИЕ

Секция "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ"	3
Секция "ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ"	118
Секция "НАДЕЖНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СТАНЦИЙ И ЭНЕРГОСИСТЕМ"	213
Секция "ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭЭРГЕТИКЕ: ЧЕЛОВЕК, ТЕХНИКА, ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА"	256

Материалы
Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**
(XVII Бенардосовские чтения)

Печатаются в авторской редакции

I том
Электроэнергетика

Подписано в печать 26.04.2013. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 18,37. Уч.-изд. л. 19,4. Тираж 200 экз. Заказ .
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто»
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39