

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

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2012»

РЕГИОНАЛЬНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)

ИВАНОВО, 17 – 19 апреля 2012 г.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 3/2

ИВАНОВО

ИГЭУ

2012

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – Т. 3/2. – 52 с.

Помещенные в сборник тезисы докладов студентов и аспирантов электроэнергетического факультета Ивановского государственного энергетического университета отражают основные направления научной деятельности кафедр в области электроэнергетики и высшего профессионального образования.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, интересующихся вопросами электроэнергетики.

Тексты тезисов представлены авторами в виде файлов, сверстаны и при необходимости сокращены. Авторская редакция сохранена.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

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

СЕКЦИЯ 17

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Председатель – старший преподаватель **Беляев Г.В.**

Секретарь – ассистент **Степанова Ю.М.**

*С.В. Воробьев, маг.;
рук. А.В. Гусенков, к.т.н., доцент
(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. Основным элементом грозозащиты ВЛЭП являются тросы, монтируемые на опорах выше фазных проводов. Опыт эксплуатации показывает, что наличие на ВЛЭП грозозащитных тросов снижает количество их отключений в результате поражения молнией в несколько раз.

Линии на металлических и железобетонных опорах защищаются, как правило, по всей длине, линии на деревянных опорах и опорах из изоляционного бетона – только на подходах к подстанциям. В среднем, число грозовых отключений ВЛЭП 110 – 220 кВ на металлических и железобетонных опорах, приведенное на 100 км и 100 грозовых часов, составляет 0,2 – 1,4 и 4 – 12 раз в год соответственно для линий с тросами и без них.

Однако установка на ВЛЭП грозозащитных тросов имеет ряд серьезных недостатков:

1) Тросы значительно увеличивают стоимость сооружения линий. Стоимость тросовой защиты линий электропередачи достигает 25 % стоимости опор.

2) Наличие троса на ВЛЭП с опорами из дерева или изоляционного бетона снижает уровень их грозоупорности. Это объясняется тем, что при поражении молнией линий с тросами и без них перекрытие, приво-

далее к их отключению, имеет различные траектории. При отсутствии троса перекрытие происходит между фазами, а линиях с тросом – между фазой и заземляющим трос спуском, то есть по меньшему пути, что соответствует меньшему уровню грозоупорности линии.

Нередки случаи обрывов тросов в результате коррозии, являющиеся одной из причин отключений ВЛЭП. Такие неполадки с тросами приводят в среднем к одному устойчивому отключению в год на 1000 км линии, что соизмеримо с аварийностью гирлянд. Длительность перерыва электроснабжения в результате обрыва троса – значительна.

В процессе эксплуатации грозозащитные тросы ВЛЭП стареют и требуют замены. Не своевременная замена грозозащитного троса приводит к его обрыву и аварийным отключениям ВЛЭП. Экономические трудности приводят к принятию необоснованных решений о снятии тросов с ВЛЭП. Повышение числа отключений ВЛЭП вследствие демонтажа тросов, 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. В качестве коррозионностойких материалов могут быть использованы полимерные материалы с повышенной удельной проводимостью. Однако эти материалы имеют повышенное активное сопротивление по отношению к стали. По этой причине необходимо провести анализ влияния величины активного сопротивления троса на грозоупорность ВЛЭП.

Методика расчета основывается на математической модели троса с распределенными параметрами. Для оценки практического значения влияния активного сопротивления грозозащитного троса, произведем 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°. Проведенные расчеты показывают, что при повышении активного сопротивления удастся достичь снижения числа отключений для случая «удар молнии в трос в середине пролета» до 50 %.

В результате выполненной работы показано, что увеличение удельного активного сопротивления грозозащитного троса ВЛЭП приводит к повышению ее грозоупорности.

Анализ волновых процессов в грозозащитном тросе показал, что увеличение удельного активного сопротивления троса до 4 – 7 Ом/м приводит к такому же снижению крутизны волны грозовых перенапряжений,

как импульсная корона. Дальнейшее увеличение удельного активного сопротивления троса до уровня 15 Ом/м позволяет снизить крутизну волны тока, распространяющуюся по грозозащитному тросу на 50 %. При таких удельных активных сопротивлениях троса вдоль него возникает градиентное распределение напряжения не превышающее 1 кВ/м, что значительно ниже электрической прочности большинства материалов при пробое по поверхности. Это позволяет предположить, что при распространении волн грозовых перенапряжений по тросу перекрытия по его поверхности не происходить не будут.

Расчет нагрева грозозащитного троса при протекании токов молнии показал, что даже при значительных удельных активных сопротивлениях троса достигающих 5 – 10 Ом/м температура материала не превысит 350 °С.

А.А. Иванова, маг.;
рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются одними из значимых и наиболее массовых элементов электроэнергетических систем. Они в большой степени определяют надежность электроснабжения потребителей электроэнергии.

Опыт эксплуатации показал, что силовые трансформаторы выходят из строя в первую очередь из-за износа или повреждения изоляции. Обеспечить длительную службу изоляции оказалось труднее всего и поэтому срок службы всех остальных частей трансформаторов выбирают исходя из срока службы изоляции. Эта проблема осложняется еще и тем, что в эксплуатации находится значительное количество трансформаторов со сроком службы более 25 лет (до 40 %).

В этих условиях одной из главных задач является развитие средств диагностики, дающих возможность проведения общего обследования оборудования собственными силами, результаты которого создают целостную картину динамики изменения основных параметров оборудования,

определяющих его техническое состояние и являющихся обоснованием для комплексного обследования оборудования с целью принятия решений о выводе его в ремонт или замены.

Существующая нормативно-техническая система диагностики изоляции силовых трансформаторов включает более 40 испытаний. Такой подход к оценке качества трансформаторного масла слишком трудоемкий, дорогой и занимает много времени. Вместе с тем он не дает однозначного ответа по оценке технического состояния трансформаторного оборудования.

В данной статье на основе анализа существующей системы диагностики изоляции трансформаторов сделана попытка выявления возможных направлений выбора рациональной структуры системы испытаний изоляции маслонаполненных силовых трансформаторов. С этой целью проанализирована информативность всех имеющихся испытаний изоляции силовых трансформаторов. Проведен анализ и выбор наиболее информативных методов испытаний трансформаторного масла.

Здесь следует отметить, что в практике эксплуатации в целях сокращения эксплуатационных расходов без снижения эффективности оценки качества изоляции электрооборудования применяется сокращенный анализ масла. Опыт показал, что при нормальной эксплуатации, когда показатели качества эксплуатационного масла не приближаются к предельно допустимым значениям и не наблюдается ухудшения характеристик твердой изоляции, сокращенного анализа достаточно для контроля состояния масла и прогнозирования его срока службы.

Сокращенный анализ предусматривает определение следующих параметров:

- пробивное напряжение;
- внешний вид и цвет;
- наличие механических примесей и свободной воды;
- кислотное число;
- температуру вспышки;
- реакцию водной вытяжки.

Введение сокращенного анализа фактически впервые в практике диагностирования изоляции трансформаторов выделяет наиболее информативные методы испытания трансформаторного масла.

Многолетний опыт проведения испытаний показал, что имеет место некоторые недостатки, как при проведении сокращенного анализа, так и полного анализа. Трудность состоит в том, что возникает неопределенность в определении момента, когда нужно переходить с сокращенного анализа на полный, так как отсутствуют количественные методы оценки момента этого перехода.

В результате для решения этой неопределенности целесообразно расширить перечень методов испытаний при сокращенном анализе другими, более информативными методами из общего перечня всех методов испытаний.

Такой подход, например использовался в МРСК «Северо-Запада» при разработке ТУ (СТО), в котором приведен следующий перечень контролируемых параметров:

- пробивное напряжение;
- кислотное число и содержание водорастворимых кислот и щелочей;
- тангенс угла диэлектрических потерь;
- содержание механических примесей;
- температура вспышки масла в закрытом тигле;
- содержание воды в масле (влагодержание);
- внешний вид;
- концентрации газов (метан, этан, этилен, ацетилен, водород, оксид и диоксид углерода).

Аналогичная тенденция выявилась при анализе результатов проведенной экспертной оценки степени информативности существующих методов испытаний масла. Усредненные значения оценок экспертов (десятибалльная шкала) из числа ведущих сотрудников химлабораторий электроэнергетических предприятий по методу Дельфи позволила установить их степень информативности в следующем порядке:

- пробивное напряжение – 10;
- содержание воды в масле (влагодержание) – 10;
- общее газосодержание масла – 10;
- тангенс угла диэлектрических потерь – 9,5;
- концентрации газов (метан, этан, этилен, ацетилен, водород, оксид и диоксид углерода) – 9;
- кислотное число – 9;
- содержание водорастворимых кислот и щелочей – 9;
- содержание антиокислительной присадки ионол – 9;
- содержание механических примесей – 8;
- цвет масла – 8;
- внешний вид – 7,7;
- температура вспышки масла в закрытом тигле – 6,8.

Полученные экспертные оценки достаточно хорошо коррелируют с системой оценки изоляции, предложенной МРСК «Северо-Запада».

Кроме того, необходим индивидуальный подход для оценки качества трансформаторного масла с большим сроком эксплуатации оборудования (свыше 25 лет). Для таких трансформаторов важно предусмотреть применение методов, реагирующих непосредственно на продукты старения изоляции (образование газов, коллоидных частиц, различных окислов и кислот и др.).

К числу таких методов можно отнести:

- газовую хроматографию;
- контроль количества коллоидных частиц;
- определение степени полимеризации бумажной изоляции;
- содержание фурановых соединений в масле;
- содержание в масле продуктов старения по ИК-спектру;
- содержание растворимого шлама.

К этой группе также можно отнести и некоторые методы диагностики изоляции трансформаторов в целом:

- контроль частичных разрядов;
- тепловизионный контроль.

Наряду с уже отмеченными методами в настоящее время обсуждается применение новых методов диагностики:

- применение виброконтроля;
- анализ электромагнитного излучения электрооборудования;
- частотный анализ, основанный на изучении поляризационных процессов в маслонаполненном оборудовании.

Для успешного внедрения новых методов необходимо накопить достаточный экспериментальный материал и на этой основе разработать рекомендации для их эксплуатационных испытаний.

Проведенный анализ существующих методов позволяет сформулировать дополнительные требования, предъявляемые к вновь разрабатываемым методам диагностирования состояния изоляции силовых трансформаторов: универсальность, позволяющая учитывать как старение, так и увлажнение изоляции; высокая чувствительность и однозначность оценки; обладание положительной диагностической полезностью в зоне нормированных значений контролируемых параметров.

Применительно к оценке технического состояния изоляции трансформаторов с большим сроком службы назрела необходимость разработки нормативных документов, регламентирующих саму процедуру продления их ресурса. При этом следует учесть особенности эксплуатации трансформаторов с различными номинальными значениями напряжения и мощности трансформаторов.

Из этого следует, что для более эффективной диагностики изоляции трансформаторов нужен комплекс традиционных и новых методов обнаружения развивающихся дефектов.

Важную информацию о развитии дефектов во времени можно получить при непрерывном мониторинге состояния изоляции под рабочим напряжением.

А.В. Кириленко, студ.;
рук. А.М. Соколов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Поставлена цель – разработать и исследовать простой, малогабаритный и недорогой источник питания для высоковольтных испытательных установок, используемых, прежде всего для профилактических испытаний изоляции кабелей постоянным напряжением.

На основании анализа и обобщения литературных сведений установлено, что для профилактических испытаний изоляции наиболее распространенных объектов – силовых кабелей 6 – 10 кВ требуется постоянное напряжение 60 кВ, при токе в нагрузке до 3 мА.

Источники питания на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения получили к настоящему времени широкое применение в различной бытовой электронной аппаратуре. Благодаря повышенной частоте выходного напряжения (до 100 кГц) они имеют существенно меньшие вес и габариты, чем традиционные трансформаторные источники питания 50 Гц.

Эффективность работы источника питания определяется в первую очередь типом и характеристиками выбранных полупроводниковых ключей, в качестве которых в начале пути силовой полупроводниковой электроники использовались тиристоры, обладающие своими недостатками: сложная система управления, большие габариты, высокая стоимость. С появлением мощных высоковольтных транзисторов у конструкторов появилось второе дыхание и свобода выбора характеристик преобразователя напряжения. Использование биполярных транзисторов нежелатель-

но из-за большой мощности управляющего сигнала (управляются током), зависимость параметров от температуры, искажение формы выходного сигнала, большие потери. Полевые МОП (MOSFET) транзисторы лишены многих этих недостатков: управляются напряжением, параметры не сильно зависят от температуры (положительный температурный коэффициент), высокая частота переключения, малое сопротивление канала, широкий диапазон рабочих токов, рабочее напряжение теоретически не имеет нижнего предела. Самым перспективным направлением создания современных силовых транзисторов являются комбинированные биполярно-полевые структуры, сочетающие принцип полевого управления и биполярный механизм переноса тока. Наиболее распространен вариант конструкции, называемый биполярным транзистором с изолированным затвором, или IGBT. Особенности этого типа транзисторов: управляются напряжением, высокое входное сопротивление, низкое значение остаточного напряжения в открытом состоянии, широкий диапазон рабочих токов и напряжений (до 1,2 кА и 10 кВ), верхний предел рабочих частот 150 кГц (серия *Warp speed*), исключение эффекта «зашелкивания» режима работы. Целесообразно выбирать мощные МОП или IGBT транзисторы в зависимости от характеристик проектируемого источника питания (рис. 1).

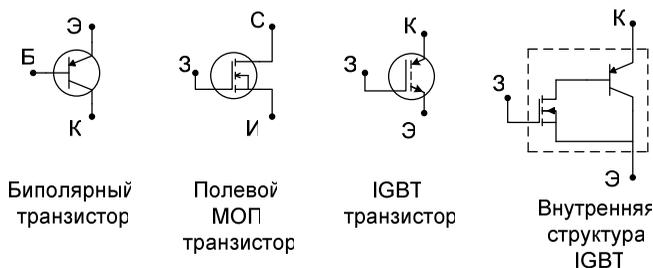


Рис. 1. Типы транзисторов

Вторым важным моментом при разработке источника питания является правильный выбор схемы самого высокочастотного преобразователя. Наиболее простыми и эффективными схемами являются полумостовая (рис. 2, а) и мостовая схемы (рис. 2, б). Полумостовой преобразователь рекомендуется использовать для источников питания мощностью до 700 ватт. Полумостовая схема уменьшает выходное напряжение в 2 раза. В мостовой схеме используется 4 транзистора, следовательно, мощность потерь удваивается, однако за счет вдвое большего напряжения на выходе общая мощность при сохранении тока вырастет в 4 раза.

Это позволяет использовать данную схему в мощных источниках питания. Именно для высоковольтного применения выгодно вдвое большее выходное напряжение мостовой схемы.

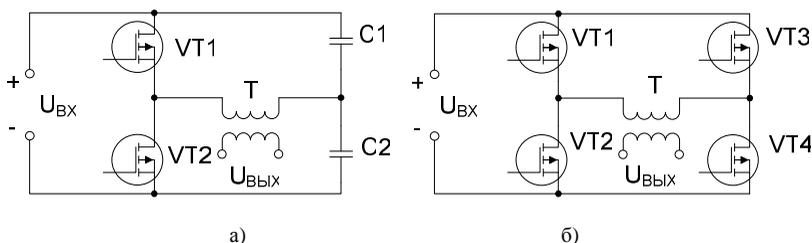


Рис. 2. Полумостовая и мостовая схемы преобразователей напряжения

В зависимости от мощности источника питания выбирается вид питающего напряжения. Однофазное напряжение применяется при мощности нагрузки не более $5 \div 6$ кВт (рис. 3, а). В результате питания от однофазной сети величина выпрямленного напряжения, подаваемого на транзисторный преобразователь напряжения достигает 300 В, а при трехфазном напряжении – до 500 В. Видно, что трехфазная сеть обеспечивает более выгодное напряжение для дальнейшего преобразования.

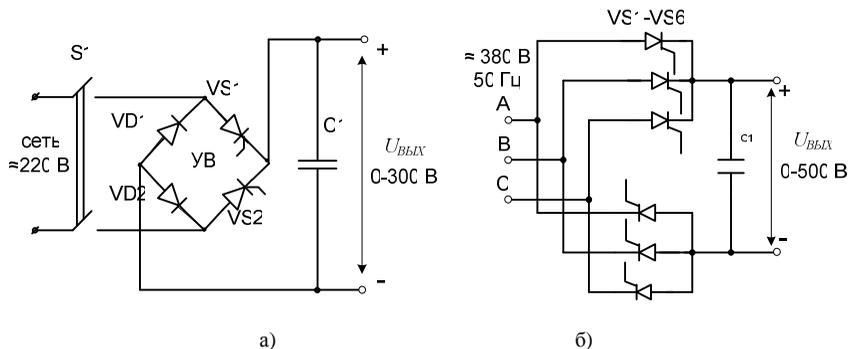


Рис. 3. Схемы выпрямителей-регуляторов напряжения

В схеме низкочастотного преобразователя отсутствует разделительный трансформатор и дроссель, а выпрямление трехфазного напряжения осуществляется по схеме Ларионова. Для сглаживания пульсации на выходе включен низкочастотный фильтр – конденсатор большой емкости (рис. 3, б).

В плечо моста включается либо высокочастотный повышающий трансформатор (Т), служащий для повышения напряжения и гальванической развязки, либо разделительный трансформатор.

Описанная схема представляет собой первый блок высоковольтного источника питания, и может быть использована как самостоятельно, так и в составе технологической установки для высокочастотной электротепловой обработки бетона, обеспечивающей высокую энергетическую эффективность, теоретически приближающуюся к 100 % (рис. 4).

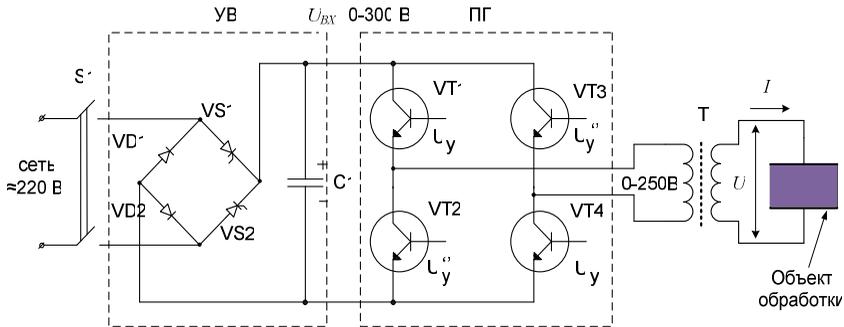


Рис. 4. Схема технологической установки для электротепловой обработки бетона

Так как на выходе требуется получить намного более высокое напряжение, необходимо было найти другой способ эффективного повышения кратности преобразования. Данным решением стало использование каскадных выпрямителей. Они достаточно давно нашли применение в высоковольтной технике. Но использование их на промышленной частоте практически малоприменимо и связано с рядом недостатков, таких как пульсация напряжения, значительные потери напряжения при большой нагрузке, большие величины емкостей. С увеличением частоты напряжения пульсации и потери сократились, поднялась мощность нагрузки.

Вторичная обмотка повышающего высокочастотного трансформатора подключается на вход блока умножителей напряжения. Блок схема источника питания приведена на рис. 5.

Критериями выбора схемы и кратности каскадного выпрямителя стали снижение напряжения при заданном токе нагрузки, искажение формы кривой на выходе полупроводникового преобразователя, технико-экономические и массогабаритные показатели проектируемого источника питания. В лабораторных условиях на стенде исследовали три схемы

в различных режимах работы, результаты которых представлены на рис. 6 и рис. 7.

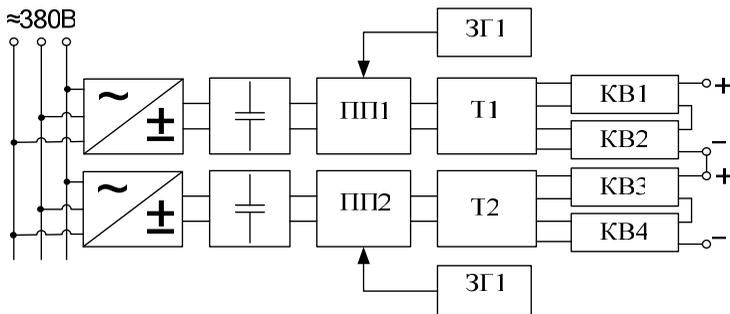


Рис. 5. Блок-схема высоковольтного источника питания

При работе на нагрузку схема 8-кратного умножения обладала наибольшим снижением напряжения, около 35 %, и вносила сильные искажения в форму сигнала, что недопустимо для работы преобразователя.

Схема удвоения напряжения увеличивала общее число элементов, что так же недопустимо, но обеспечивала минимальное снижение напряжения в 6 % и была проста в исполнении.

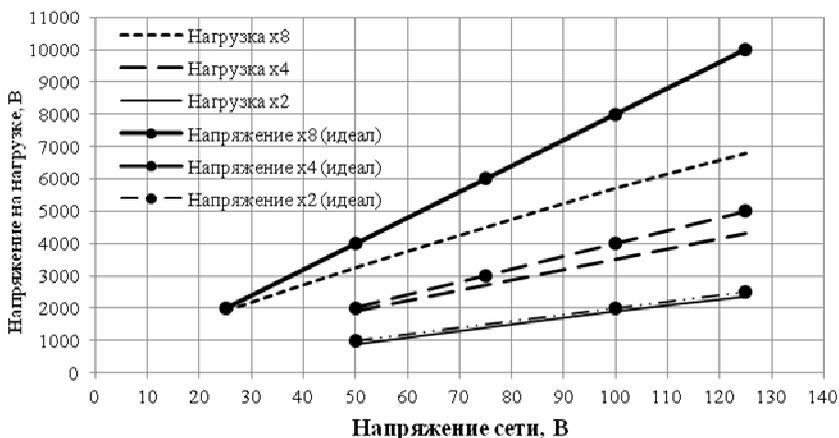


Рис. 6. Напряжение на выходе каскадного выпрямителя

Схема 4-кратного умножения предоставила лучшие показатели. При подключенной нагрузке наблюдается снижение напряжения вслед

за увеличением тока нагрузки. При требуемом токе 3 мА снижение напряжения достигло 14 %.

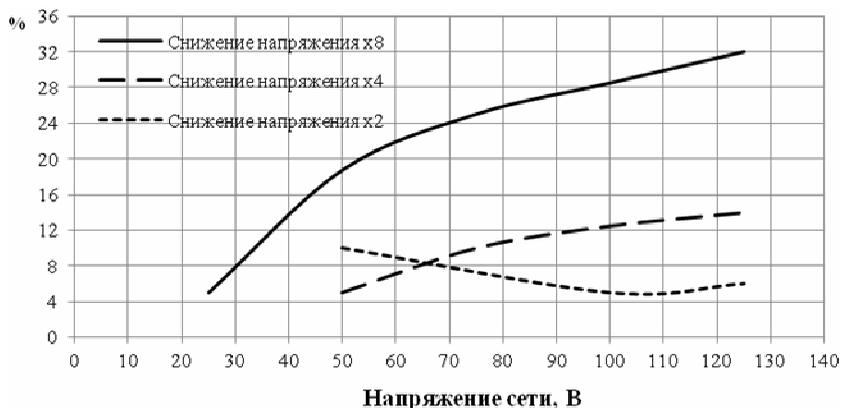


Рис. 7. Снижение напряжения на выходе каскадного выпрямителя

Коэффициент полезного действия по мощности всех схем приближается к 75 %. Для испытательной установки этого более чем достаточно.

На основании приведенных результатов лабораторных исследований была разработана конструкция источника питания для высоковольтной испытательной установки, схема которой представлена на рис. 8. После изготовления такого источника питания выполнены его экспериментальные исследования, построены выходная (рис. 9) и нагрузочная (рис. 10) характеристики.

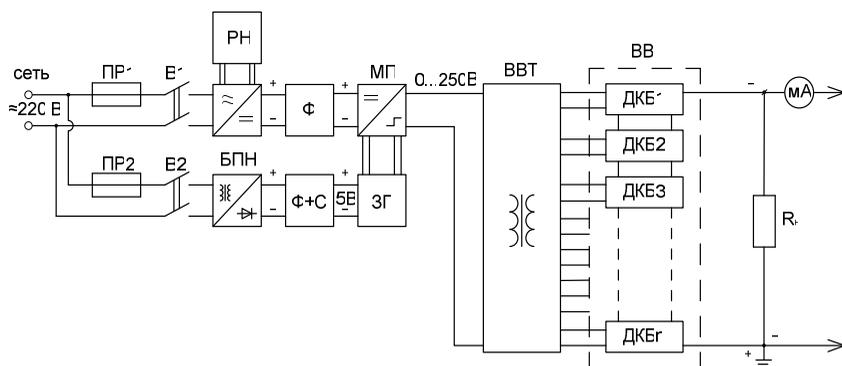


Рис. 8. Схема источника питания для высоковольтной испытательной установки

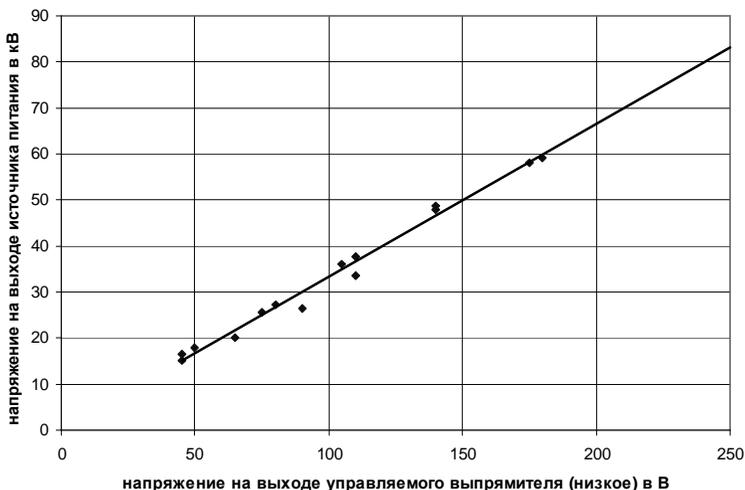


Рис. 9. Зависимость напряжения на выходе от напряжения на входе

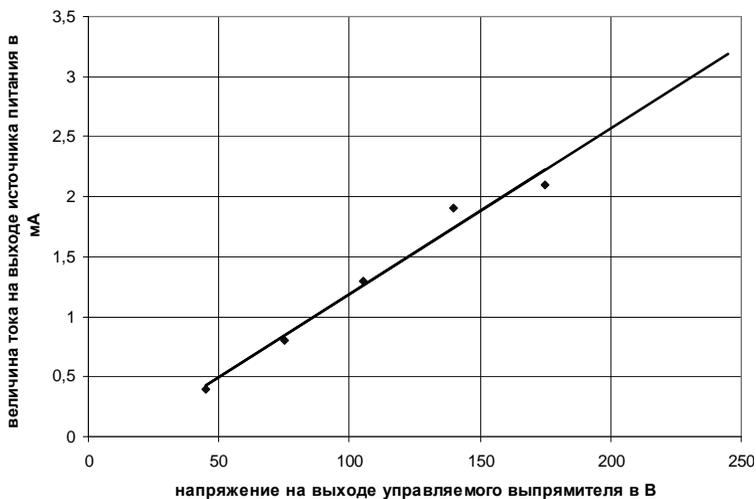


Рис. 10. Зависимость величины тока на выходе от напряжения на входе

Опыт работы с источником питания на основе транзисторного преобразователя напряжения, полученный в ходе выполненных разработок и исследований, позволяет сделать вывод о высокой надежности такого устройства.

*Р.Д. Луговкин, маг.; А.А. Уваров, А.В. Наумов, студенты;
рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С БОЛЬШОЙ ЕМКОСТЬЮ

Количество электрооборудования, отработавшего нормативный срок службы, постоянно растет. Около 70 % силовых трансформаторов, эксплуатируемых на российских предприятиях электрических сетей, имеют наработку более 25 лет. Надо заметить, что проблема существует не только в России, но и во многих развитых странах Европы, и в Америке. По данным Института электроэнергетики EPRI (США), в 1997 г. около 65 % силовых трансформаторов в сетях США отработали более 25 лет.

В связи с этим все более актуальным становится обоснованное продление сроков службы такого оборудования на основе результатов эксплуатационного мониторинга. Расчеты специалистов США и Швейцарии показывают, что ранняя диагностика трансформаторов и автотрансформаторов снижает расходы на ремонт на 75 %, потери от недоотпуска электроэнергии – на 63 %, а ежегодная экономия составляет 2 % от стоимости нового трансформатора.

Наиболее эффективными методами определения дефектов являются газохроматографический и физико-химический анализы масла. Однако их выполняют в специализированных лабораториях, зачастую пробы масла приходится доставлять на значительные расстояния. Поэтому желательно при оценке технического состояния электрооборудования опираться на выполняемые непосредственно в полевых условиях традиционные методы оценки, постоянно их совершенствуя.

Одним из таких методов является испытание изоляции повышенным напряжением. Это испытание производится для обнаружения сосредоточенных дефектов в изоляции электрооборудования, не выявленных в предварительных испытаниях из-за недостаточного уровня напряженности электрического поля. Испытание повышенным напряжением обязательно для электрооборудования напряжением 35 кВ и ниже, а при наличии испытательных устройств – и для оборудования напряжением выше 35 кВ, за исключением случаев, оговоренных нормами. В качестве испытательного обычно используется напряжение промышленной частоты 50 Гц. При испытании изоляции крупных электрических машин, тяг выключателей, разрядников, силовых кабелей напряжением свыше 1 кВ в качестве испытательного используется выпрямленное напряжение.

Основным недостатком испытания выпрямленным напряжением является неравномерное распределение напряжения по толщине изоляции (из-за неоднородности) в зависимости от проводимости отдельных ее частей, а во время эксплуатации напряженность распределяется в зависимости от диэлектрической проницаемости частей изоляции.

Однако испытание выпрямленным напряжением имеет и преимущества:

1) Выпрямленное напряжение менее опасно для изоляции (пробивное выпрямленное напряжение выше, чем переменное, в среднем в 1,5 раза).

2) У машин распределение напряжения вдоль изоляции обмотки более равномерно при выпрямленном напряжении, благодаря чему одинаково испытываются низовые и лобовые части.

3) Требуемая мощность выпрямительных установок высокого напряжения значительно меньше, чем установок переменного напряжения, благодаря чему передвижные установки всегда менее громоздки и поэтому более портативны и представляется возможным проводить испытание объектов с большой емкостью (кабелей конденсаторов и др.).

Кроме того, при таких испытаниях имеется возможность измерения токов утечки, являющихся дополнительным критерием оценки состояния изоляции.

При выборе мощности испытательной установки используют выражение:

$$S_{исп} = \omega C U_{исп}^2 \cdot 10^{-9}, \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

где C – емкость испытываемой изоляции, пФ; $U_{исп}$ – испытательное напряжение, кВ; ω – угловая частота испытательного напряжения ($\omega = 2\pi f$).

Ориентировочная емкость некоторых объектов испытания приведена в табл. 1.

Таблица 1. Ориентировочная емкость электрооборудования

Наименование электрооборудования	Емкость одной фазы, пФ
Турбогенераторы мощностью, МВт	
от 15 до 150	100000 – 300000
от 150 до 300	300000 – 500000
Силовые трансформаторы(обмотки низкого напряжения)	1000 – 25000
Электрические двигатели мощностью, кВ А	
до 100	1000 – 10000
свыше 100	10000 – 100000

Окончание табл. 1	
Наименование электрооборудования	Емкость одной фазы, пФ
Вводы трансформаторов и масляных выключателей напряжением, кВ	
до 220	50 – 300
от 330 до 500	800 – 1300
Трансформаторы напряжения и тока	100 – 1000

Испытание напряжением постоянного тока, которое в течение нескольких десятилетий успешно использовалось, в случае с твердой изоляцией сшитого полиэтилена кабелей оказалось непригодным. При испытании напряжением постоянного тока в изоляции, на инородных микровключениях молекул воды, образуется объемный заряд. Этот заряд не разряжается при традиционном снятии остаточного заряда с кабеля путем заземления, так как сверху и снизу от этого внутреннего «конденсатора» – диэлектрик – сшитый полиэтилен (рис. 1).

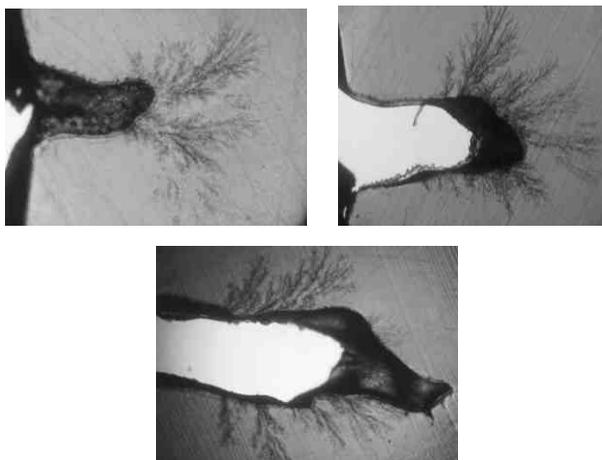


Рис. 1. Формирования пробоя в канале водяного дерева

При последующей подаче рабочего напряжения переменного тока происходит суммирование напряженностей электрических полей, что может привести к локальному превышению предела прочности изоляции и к появлению так называемых «электрических древовидных структур». Происходит необратимое повреждение изоляции, частичные разряды, возникающие в этом, уже слабом месте изоляции, способствуют развитию трингов. Также развитию этих дефектов способствуют действия электрического поля, воды, механических дефектов и времени. То есть

при появлении триинговпод действием вышеперечисленных факторов через некоторое время в месте дефекта происходит пробой.

По этой причине для испытаний кабеля с СПЭ изоляцией необходимо использовать переменное напряжение; постоянное изменение полярности заряда компенсирует накапливающиеся заряды, разряжая их. Особенно эффективно испытание на синусоидальном напряжении сверхнизкой частоты (СНЧ), так как при этом достигается максимальная скорость развития пробоя, и наверняка будут выявлены все присутствующие дефекты за время испытания. Важно и то, чтобы форма выходного напряжения была симметричной. Так как при несимметричной форме напряжения может произойти накопление постоянной составляющей и создаться объемный заряд, который может в последствии повредить кабель (рис. 2).

Также у СНЧ-установок есть преимущество по сравнению с установками промышленной частоты – относительно малые габариты. При этом, чем ниже частота, тем меньше мощность испытательной установки. К примеру, силовой кабель с рабочим напряжением 15 кВ протяженностью 3 км имеет емкость 1 мкФ. При испытании частоты 50 Гц емкостное сопротивление составит 3180 Ом. Стандарт IEEEE400 рекомендует испытывать подобные объекты напряжением величиной 22 кВ. Чтобы получить такое испытательное напряжение потребуется ток величиной 7 А и мощностью порядка 150 кВА. Вес такой установки достигнет несколько тонн. Очевидно, что установка с такими параметрами совершенно не подходит для проведения полевых испытаний. При использовании частоты 0,1 Гц емкостное сопротивление составит 1,6 МОм. То же испытательное напряжение величиной 22 кВ получается при величине тока 14 мА и мощность 0,302 кВА. Это в 500 раз меньше, чем при испытании частоты 50 Гц. А это означает, что установка может быть компактной, легкой и портативной.



Рис. 2. Сравнение форм выходного напряжения

Таким образом, основное направление развития высоковольтной испытательной техники для проведения испытания повышенным напряжением электроэнергетических объектов с большей собственной емкостью – это использование установок сверхнизкой частоты (0,1 Гц). На кафедре ВЭТФ ИГЭУ ведется исследование процессов, происходящих в изоляции при воздействии высокого напряжения с частотой от 0 до 10 кГц, а также изучаются возможные схемы высоковольтного источника питания на основе современной высоковольтной силовой полупроводниковой базы для создания новых испытательных установок, в том числе и для передвижных испытательных лабораторий.

Н.В. Масленников, студ.;
рук. Г.А. Филиппов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

Для качественного надежного и бесперебойного электропитания потребителя необходимы регулярный контроль и своевременная профилактика электрооборудования, которая обеспечивается путем качественного и систематического обслуживания. Одним из основных методов контроля электрооборудования, является контроль изоляции оборудования высокого напряжения. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь является одним из основных методов, позволяющим оценивать состояние изоляции.

Внешние электрические поля создаются от работающего под напряжением оборудования. Как известно, в энергетике в одном помещении находится большое количество электрооборудования, что приводит к возникновению большого количества внешних электромагнитных полей, которые создают помехи для измерительных приборов. В результате действия внешних полей измерительные приборы, могут давать не истинное значение измеряемых величин, а ошибочное. При измерениях тангенса угла диэлектрических потерь на действующих подстанциях, вблизи от работающего под напряжением оборудования, избежать внешних влияний, как правило, не удается. Экранировать саму изоляционную

конструкцию, подвергаемую испытаниям, в условиях эксплуатации невозможно. Поэтому при измерении необходимо учитывать влияние внешних электрических полей.

Степень влияния внешних полей на измерительные приборы зависит от величины ЭДС влияния и емкости влияния. Поскольку в условиях эксплуатации число объектов находящихся под напряжением и влияющих на процесс измерения тангенса угла диэлектрических потерь может быть значительным, тогда ЭДС влияния и емкость влияния следует рассматривать как эквивалентные. При этом на погрешность измерения оказывают влияние величина ЭДС влияния и фазовый угол сдвига между вектором испытательного напряжения и вектором ЭДС влияния.

Целью данной работы являлись разработка, монтаж и наладка лабораторной установки, аналогичной по условиям влияния внешних полей реальной электроустановке, проведение в данных условиях измерений тангенса угла диэлектрических потерь, а также проведение анализа полученных результатов измерения.

Установка выполнена в виде специального лабораторного стенда и состоит из двух частей:

– установка для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости высоковольтной изоляции (мост переменного тока Р5026, фазорегулятор, образцовый конденсатор, объект измерения – ввод с твердой изоляцией на напряжение 35 кВ, НОМ-10) (рис. 1);

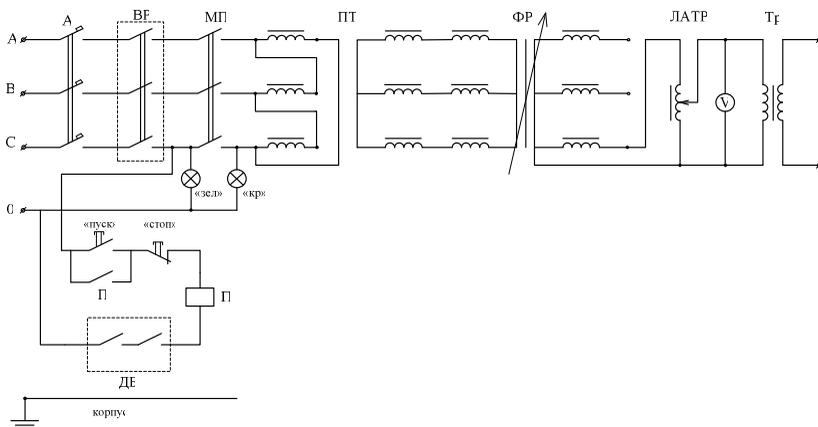


Рис. 1. Установка для измерения $tg\delta$ и C_x высоковольтной изоляции: А – автомат; ВР – видимый разрыв; ПТ – промежуточный трансформатор; МП – магнитный пускатель; ФР – фазорегулятор, НОМ – 10; ПТ; ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; Тр – трансформатор; ДБ – дверная блокировка

– высоковольтная установка (трансформатор ИОМ 100/25), оказывающая влияние внешнего электрического поля на измерительные элементы (регулируется ЭДС влияния 0 – 100 кВ, емкость влияния, фаза подключения трансформатора НОМ-10) (рис. 2).

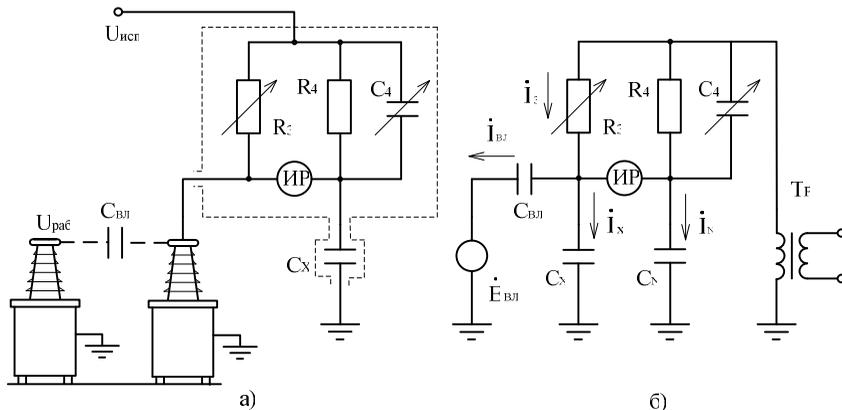


Рис. 2. Высоковольтная установка, оказывающая влияние внешнего электрического поля на измерительные элементы

Установка снабжена необходимыми коммутационными аппаратами, измерительными приборами, сигнальными лампами, защитной автоматикой, блокировкой безопасности и защитным заземлением.

Для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости в условиях эксплуатации используются мосты переменного тока (Р 525, Р 5026, Вектор 2М, СА 7100), которые позволяют проводить измерения как по нормальной схеме (рис. 3, а), когда оба электрода испытуемой изоляции могут быть изолированы от земли, так и по перевернутой схеме (рис. 3, б), когда один из электродов заземлен.

Измерение $\text{tg } \delta$ и емкости C_x выполняется высоковольтным мостом Р 5026 по перевернутой схеме, которая в большинстве случаев применяется в условиях эксплуатации. В перевернутой схеме измерительная часть моста (R_3 , C_4 , индикатор равновесия ИР и т.д.) находится под высоким потенциалом. Для обеспечения безопасных условий работы в переносных мостах предусмотрены изолирующие устройства у ручек регулируемых элементов (R_3 , C_4) и общий заземленный кожух ЗЭ, закрывающий те части моста, которые могут находиться под высоким напряжением (не более 10 кВ). На случай пробоя испытуемой изоляции в мостах устанавливаются защитные разрядники Р, которые, срабатывая, защищают элементы моста от токов короткого замыкания.

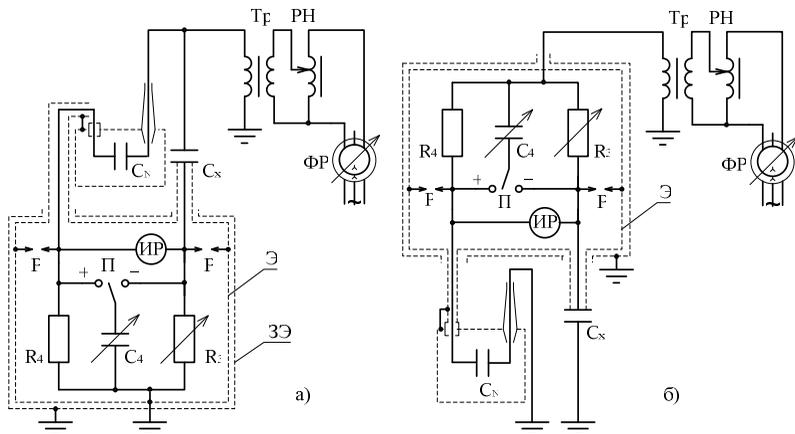


Рис. 3. Схемы мостов для измерения емкости и $\text{tg} \delta$ изоляции: а – нормальная схема; б – перевернутая схема

Контролируемый объект находится в электрическом поле, создаваемом влияющим элементом – испытательным трансформатором ИОМ 100/25. Поэтому от влияющего элемента через емкость изоляции испытываемого аппарата в землю протекают токи смещения. Также токи смещения протекают в землю через измерительные устройства. Эти токи называют токами влияния электрического поля. Фаза и значение токов смещения, а следовательно, и токов влияния зависят от режима работы и величины рабочего напряжения, влияющих элементов, взаимного расположения их и испытываемого аппарата, его геометрической формы и размеров, состояния окружающего воздуха. В качестве показателя степени влияния электрического поля принят коэффициент влияния. Наибольшие изменения Квл обусловлены изменением режима работы влияющих элементов. В зависимости от того, какие и сколько влияющих элементов находятся под рабочим напряжением, величина $K_{вл}$ при испытании изоляции одного и того же аппарата может существенно меняться в несколько раз.

Результаты исследований представлены в виде векторных диаграмм (рис. 4). По векторным диаграммам можно сделать вывод, что измеренное значение тангенса угла диэлектрических потерь в условиях внешнего влияния электрических полей отклоняется в большую или меньшую сторону от истинного значения. В ряде случаев тангенс угла диэлектрических потерь может принять и отрицательное значение, что проиллюстрировано на рис. 4, в.

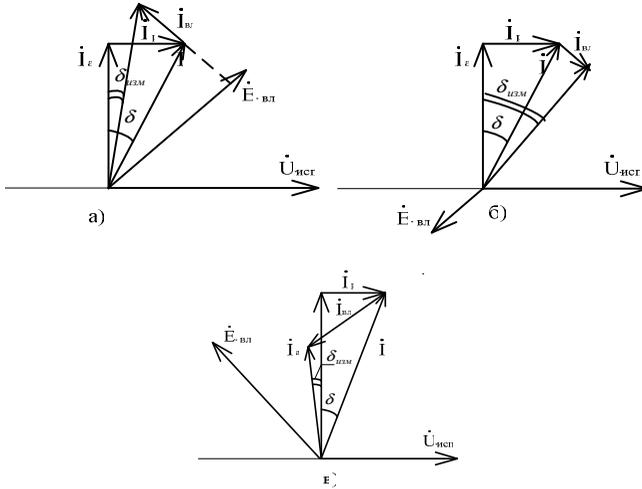


Рис. 4. Векторные диаграммы токов в плече моста R_3

Чтобы уменьшить ошибку, обусловленную внешним влиянием, производят два измерения с изменением фазы испытательного напряжения на 180° . Значение $\text{tg} \delta$ испытуемой изоляции определяют как среднее или средневзвешенное двух измерений, то есть по формулам:

$$\text{tg} \delta = \frac{\text{tg} \delta_{\text{изм}1} + \text{tg} \delta_{\text{изм}2}}{2} \quad \text{или} \quad \text{tg} \delta = \frac{\text{tg} \delta_{\text{изм}1} R_3'' + \text{tg} \delta_{\text{изм}2} R_3'}{R_3' + R_3''},$$

где R_3' и R_3'' – значение сопротивления R_3 соответственно при первом и втором измерениях. Ошибки при таких измерениях имеют разные знаки и при усреднении результатов отчасти компенсируются. Если при одном из измерений получено отрицательное значение $\text{tg} \delta$, то перед усреднением этот результат следует пересчитать по формуле $\text{tg} \delta_{\text{изм}} = \frac{R_3}{R_4} \text{tg} \delta'_{\text{изм}}$.

Полное устранение ошибки от внешнего влияния достигается при таком подборе фазы испытательного напряжения (с помощью фазорегулятора ФР), когда $\alpha = \delta$ или $\alpha = \delta + \pi$.

Библиографический список

1. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. **Локшин М.В., Сви П.М.** Измерение диэлектрических потерь высоковольтной изоляции. – М.: Энергия, 1973.

3. **Локшин М.В.** Мостовой способ измерения диэлектрических потерь изоляции высоковольтных аппаратов под рабочим напряжением // Электричество. – 1973.

4. **Локшин М.В.** Влияние постороннего электрического поля на погрешности при определении диэлектрических характеристик высоковольтной изоляции // Электричество. – 1976.

**В.В. Пуркин, Д.С. Токарев, соиск., Р.Д. Луговкин, маг.;
рук. В.Г. Свиридецкий, технический директор
(ЗАО «ОбнинскЭнергоТех», г. Обнинск)**

«УМНАЯ» ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ «УМНЫХ» СЕТЕЙ

Заместитель генерального директора – технический директор ОАО «Холдинг МРСК» Борис Иосифович Механошин в рамках Делового форума «Инновационный потенциал российского распределительного электросетевого комплекса» озвучил задачи стоящие перед распределительным сетевым комплексом России:

- обновление основных фондов, при резкоограниченных ресурсах;
- повышение надежности и качества электроснабжения потребителей.

В ОАО «Холдинг МРСК» наметили следующие пути решения задач:

- замена оборудования по фактическому состоянию;
- внедрение «умных» сетей.

Но тут возникает вопрос: «А как быть с кабельными сетями?» Если касаясь силового подстанционного оборудования и воздушных линий электропередач как проводить диагностику, определять состояние, остаточный ресурс известно, то к кабельным линиям это не применимо. У кабельной линии определить остаточный ресурс невозможно! Тогда как осуществлять рациональное обновление? И что же это такое – рациональность?

Рациональность – это экономическая целесообразность. Значит, оценку кабельной линии нужно проводить с точки зрения экономической эффективности ее дальнейшей эксплуатации, относительно переукладки. Нужно определить, что же будет дешевле: регулярно нести затраты, устраняя неисправности и возмещая иски потребителей, или же один раз потратить значительную сумму и переуложить данную кабельную линию.

Стоимость переукладки кабельной линии величина известная, затраты на устранение одной аварии и возможные иски потребителей также известны. Неизвестной остается предполагаемое количество аварий за прогнозируемый период.

$$\mathcal{E}_{\text{КЛ}} = \frac{(\mathcal{Z}_{\text{Авария}} + \mathcal{Z}_{\text{Иски}})}{\mathcal{Z}_{\text{Переукладка}}} \cdot N_{\text{Аварий}} ;$$

$$\mathcal{E}_{\text{КЛ}} \equiv N_{\text{Аварий}} ,$$

где $\mathcal{E}_{\text{КЛ}}$ – экономическая эффективность эксплуатации кабельной линии; $\mathcal{Z}_{\text{Авария}}$, $\mathcal{Z}_{\text{Иски}}$, $\mathcal{Z}_{\text{Переукладка}}$ – стоимости устранения одной аварии, возмещения исков и переукладки кабельной линии соответственно; $N_{\text{Аварий}}$ – количество аварий на кабельной линии в будущем.

И вот тут мы сталкиваемся с главной проблемой, как спрогнозировать число аварий на кабеле в будущем? Если размышлять логически, то все методы испытаний и диагностики кабельных линий направлены на определение дальнейшего срока исправной эксплуатации кабеля. Таким образом, пытаясь предсказать срок исправной эксплуатации, мы косвенно определяем число аварий в будущем. Получается, что теоретически спрогнозировать число аварий на кабеле в будущем, опираясь на некоторые объективные данные состояния изоляции, можно. Тогда какие данные можно считать объективными?

а. Простое испытание повышенным напряжением не дает ничего, кроме ответа – работоспособна линия в данный момент или нет.

б. Новые методы диагностики, такие как измерение тангенса угла диэлектрических потерь и измерение уровня частичных разрядов, после разового применения также не дают объективной информации.

Мы, специалисты ЗАО «ОбнинскЭнергоТех», полагаем, что объективными можно считать структурировано накопленные статистические данные, отражающие как динамику результатов регулярных комплексных испытаний кабельной линии в течение длительного срока эксплуатации, так динамику и характер аварий на данной линии за тот же период.

В настоящее время всеми видами испытаний на кабельных линиях занимаются передвижные электротехнические лаборатории или ЭТЛ. На данный момент электротехнические лаборатории производят только замеры и испытания, но не имеют ни функций, ни систем хранения результатов испытаний и измерений. Получение результата, его важность, достоверность и актуальность зависят полностью от эксплуатирующего персонала. Применение же современных методов диагностики состояния

изоляции кабельных линий требуют от персонала наивысшей квалификации, будь то измерение тангенса угла диэлектрических потерь или измерение частичных разрядов. А расшифровка результатов этих измерений, помимо большого количества времени, требует еще и углубленных знаний в данной области.

Мы, ЗАО «ОбнинскЭнергоТех», как производитель, хотим оснастить свои электротехнические лаборатории новыми возможностями. Мы хотим создать «Умную» лабораторию.

Что же такое «Умная» лаборатория? «Умная» электротехническая лаборатория – это:

1. ЭТЛ с управлением через центральный компьютер, в которой реализованы:

1.1. испытания кабельных линий (КЛ):

1.1.1. повышенным постоянным напряжением;

1.1.2. повышенным переменным напряжением промышленной частоты;

1.2. традиционный метод определения места повреждения (ОМП) КЛ, основанный на прожиге;

1.3. беспрожиговые методы ОМП КЛ:

1.3.1. импульсная рефлектометрия;

1.3.2. метод колебательного разряда;

1.3.3. импульсно-дуговой метод;

1.4. испытания КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена:

1.4.1. испытания напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ);

1.4.2. поиск мест повреждения защитной оболочки изоляции.

1.5. немаловажной особенностью является автоматическое создание трассы КЛ в геоинформационной системе координат при проведении трассировочных работ. Отсутствие точной документации и точного места расположения кабельных линий сильно затрудняют активное применение щадящих методов диагностики и беспрожиговых методов ОМП КЛ.

2. Благодаря управлению через центральный компьютер и специальному ПО мы можем:

2.1. получить автоматизированный сбор, структурирование и накопление статистических данных по каждой конкретной КЛ.

2.2. исключить возможность расхождения реальных данных проведенного испытания с данными в протоколе.

2.3. получить полуавтоматизированный комплекс документооборота, что позволит существенно разгрузить электроэксплуатирующий персонал.

Благодаря применению «Умных» лабораторий:

1. На основе получаемых данных мы сможем сформировать единую базу данных (БД) по КЛ подведомственной сети.
2. На основе БД создать комплекс объективной сравнительной оценки экономической эффективности эксплуатации конкретной КЛ, позволяющий помочь в определении очередности замены КЛ.
3. На основе данных комплекса объективной оценки мы сможем облегчить принятие управленческого решения, провести обоснование выбора объекта, на который будут потрачены средства, а значит рационализировать обновление основных фондов.
4. Добившись рационального обновления основных фондов, мы подготовим почву для повсеместного внедрения «Умных» сетей.

Библиографический список

1. <http://www.oetc.ru>.
2. <http://www.holding-mrsk.ru>.
3. <http://www.vniikp.ru>.
4. **Кобец Б.Б., Волкова И.О.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010.

*Д.В. Алексеев, И.С. Чернов, студенты;
рук. В.Б. Харьковский, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕГАЗОВЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

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, короткозамыкатели, 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 ап-

паратов 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 большим ресурсе работы.

Обычно в узлах герметизации в качестве уплотнителей используются резиновые кольца, сальники и их комбинации.

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 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 до +120 °С.

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 с вводом вращения для привода контактов применение МЖГ вместо резиновых колец позволяет заменить граничное трение жидкостным, что будет способствовать уменьшению момента трения.

Во многих конструкциях элегазовых выключателей управление контактами осуществляется, с помощью штока, совершающего ВПД со ско-

ростью 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.

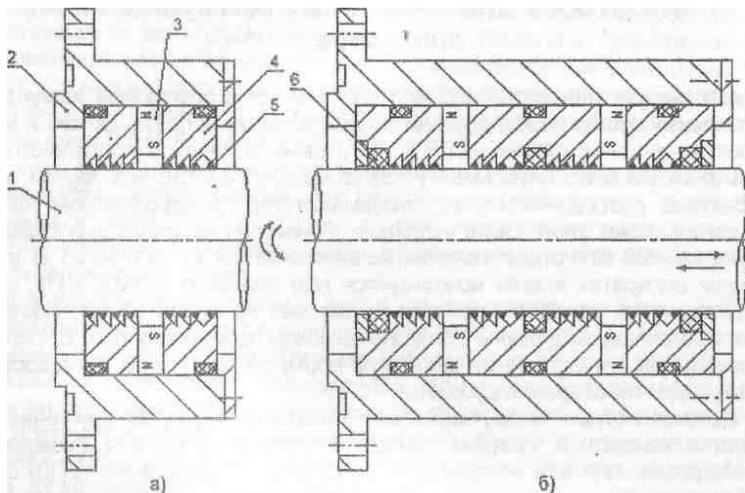


Рис. 1. а – классический МЖГ; б – традиционный МЖГ: 1 – вал; 2 – корпус из немагнитного материала; 3 – постоянный магнит; 4 – полюсная приставка; 5 – магнитожидкостный уплотнитель; 6 – резиновое кольцо

В ИГЭУ были разработаны и испытаны две конструкции МЖГ для ВПД 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 значительно 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 6, 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.

Испытания МЖГ в условиях близких к реальным также показали, что они соответствуют требованиям элегазовых коммутационных аппаратов по герметичности и ресурсу работы.

Т.Е. Шадриков, маг.;
рук. В.Ф. Воробьев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИМЕНЕНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Современная отрасль машиностроения предъявляет повышенные требования к износостойкости и коррозионной стойкости материалов, необходимые для увеличения надежности и долговечности современных деталей машин и оборудования. В настоящее время традиционные методы обработки уже не столь эффективны, ввиду малого проникновения внедряемых частиц благодаря диффузии и создания на поверхности малых концентраций частиц. В связи с этим в последнее время интенсивно развивается новые методы придания прочности деталям, основанные на воздействии на поверхность материала потоками высокоэнергетических частиц.

Ионная имплантация наиболее перспективное направление в этой области. Основная идея предлагаемой технологии заключается в том, что необходимый для имплантационной технологии процесс ускорения ионов газовых частиц разбивается на два последовательных этапа. На первом этапе необходимо получить среду со степенью ионизации близкой к 1, для достижения высоких энергий ионов, бомбардирующих поверхность обрабатываемой детали. Этап можно назвать «энергетической на-

качкой среды». На втором этапе осуществляется ускорение ионов в межэлектродном промежутке непосредственно из плазмы газового разряда низкого давления. Для его реализации к электродной системе прикладываются потенциалы высокого напряжения разной полярности. Быстрая смена полярности электродов приводит к разделению зарядов: легкие, подвижные электроны будут быстро перемещаться к аноду, оставляя вблизи катода большой нескомпенсированный объемный заряд ионов.

С целью экспериментальной проверки возможности осуществления предложенной технологии ускорения ионов непосредственно из плазмы тлеющего разряда была создана испытательная установка на базе серийно выпускаемого промышленностью вакуумного поста «Булат-3Т».

В ее состав входят (рис. 1):

- вакуумная камера (1), в которой обеспечивается поддержание предельного остаточного давления до 10^{-3} Па;
- смотровое окно (4), для наблюдения за технологическим процессом;
- высоковольтные емкостные накопители ВЕН1 (5) и ВЕН2 (6);
- разделительный высоковольтный импульсный трансформатор (7);
- блок управления технологическим процессом (8);
- система электродов в виде коаксиальных цилиндров.

Внутренний электрод (3) моделирует обрабатываемую деталь, а внешний (2) выполняет двойную функцию: создает эффект потенциальной ловушки на первом этапе работы и служит анодом на втором этапе.

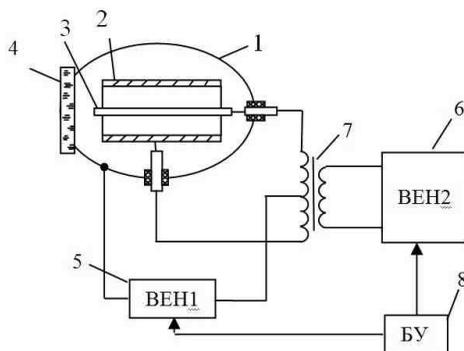


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Принцип работы установки состоит в следующем. На первом этапе осуществляется «энергетическая накачка» газовой среды в электродной системе коаксиальных цилиндров импульсом, генерируемым емкостным

накопителем ВЕН1. Импульс отрицательной полярности длительностью несколько микросекунд подается на среднюю точку вторичной обмотки разделительного импульсного трансформатора. В результате электроды (2) и (3) получают одинаковые отрицательные потенциалы величиной до нескольких киловольт, становясь катодом по отношению к заземленному корпусу вакуумной камеры (1). Вследствие этого, при достаточно высоком напряжении, в полости между электродами (2), (3) зажигается особая форма тлеющего разряда – разряд с эффектом полого катода. В этом разряде реализуется эффект «потенциальной ловушки» для электронов. Выбитые с катодов (2), (3) электроны попадают в межэлектродную область и начинают двигаться по сложной зигзагообразной траектории, претерпевая большое количество ионизирующих столкновений с нейтральными молекулами газа [3]. В результате внутри электродной системы удается достичь степени ионизации плазмы, близкой к единице.

На втором этапе производится ускорение ионов в межэлектродном промежутке импульсом, вырабатываемым емкостным накопителем ВЕН2. Напряжение этого импульса увеличивается импульсным трансформатором (7) до ± 50 кВ. Ускоряющее напряжение прикладывается между электродами (2) и (3). При этом электрод (2) становится катодом, а электрод (3) – анодом. Длительность импульса определяется временем разряда емкостных накопителей и составляет несколько десятков микросекунд. Задержка генерации второго импульса относительно первого плавно регулируется блоком управления в пределах $1 \div 100$ мкс.

Особый интерес для ионной имплантации представляет синтез алмазоподобных пленок. Технология выращивания алмазных структур из газовой фазы разрабатывалась Б.В. Дерягиным и Д.В. Федосеевым в московском институте физической химии в 60-х годах XX века. При решении этой задачи ими было показано, что рост алмазных структур возможен при перенасыщении углеродом приповерхностных слоев подложки. Создание таких условий в газовой фазе достаточно сложно, поэтому результаты их опытов показали достаточно низкую производительность метода. Для повышения концентрации атомов углерода на поверхности подложки можно использовать сильные электрические поля, которые воздействуют на положительно заряженные ионы углерода, образующиеся в результате электрического разряда в углеродсодержащем газе. Учитывая особенности технологического процесса, наиболее подходящим для этих целей можно считать именно электрический разряд в газе при низком давлении среды (тлеющий и дуговой разряды в вакууме).

Чтобы оценить эффективность предложенной технологии, была произведена обработка образца – цилиндра диаметром 30 мм длиной

116 мм из стали 38ХМЮА. В экспериментальных исследованиях в качестве рабочего газа использовался азот. Во время экспериментов поддерживалось постоянное давление 10 Па. Амплитудное напряжение импульса «энергетической накачки» составляла 950 В, амплитуда ускоряющего напряжения ± 50 кВ. Задержка второго импульса относительно первого составляла 40 мкс. Частота подачи импульсов 0,1 Гц. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 (зависимость 1). Для сравнения на этом же графике приведена зависимость микротвердости в зависимости от времени обработки той же стали традиционным газопечным методом азотирования (зависимость 2).

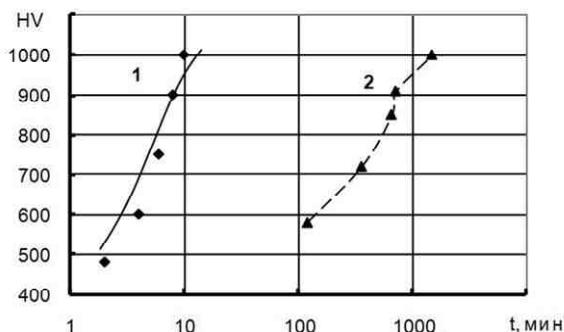


Рис. 2. Зависимость микротвердости стали 38ХМЮА от времени обработки: 1 – азотирование методом имплантации; 2 – газопечное азотирование

Как видно из рис. 2, предлагаемая технология позволяет достичь той же микротвердости, что и газопечной метод азотирования (1100 HV) за меньшее время. При этом, газопечной метод является более энергоемким. Микротвердость стали после обработки увеличивается в 2,5 раза (рис. 3)

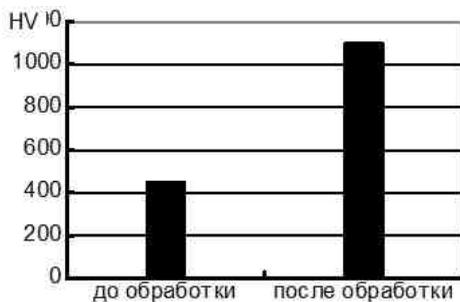


Рис. 3. Микротвердость стали до и после обработки

Установка собрана на базе кафедры ВЭТФ ИГЭУ и постоянно модернизируется. Намечены испытания плазмы зондовым методом для мониторинга состояния плазмы и количества заряженных частиц, осаждаемых на катоде.

Библиографический список

1. **Воробьев В.Ф., Ильин Н.В., Шипко М.Н.** Повышение коррозионной стойкости постоянных магнитов в устройствах магнитожидкостных уплотнений // Вестник машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 20 – 23.
2. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
3. **Шипко М.Н., Воробьев В.Ф., Беляев Г.В., Крайков А.Н.** Оптимизация электродных систем ускорителей ионов // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 1. – С. 70 – 72.

Г.Н. Шикиль, студ.;
рук. С.А. Словесный, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЛИНИЙ

На сегодняшний день в электроэнергетике все более актуальной становится проблема ЭМС (электромагнитной совместимости). Это обусловлено целым рядом причин, в том числе и постоянно расширяющимися масштабами применения информационных линий, основной задачей которых является обмен информацией.

Основной проблемой, требующей решения при передаче информации, является защита цепей от внешних электромагнитных помех (ЭМП).

Электромагнитная помеха – это любое электромагнитное явление естественного или искусственного происхождения, которое может ухудшить качество функционирования технического средства.

Все помехи классифицируются по источникам возникновения, по средам распространения и по спектральным характеристикам.

В зависимости от источника различают естественные и искусственные помехи. Естественные помехи – это удары молнии, разряды статического электричества, космические излучения.

Искусственные помехи – это радиопередатчики, электродвигатели, воздушные линии электропередачи.

В зависимости от среды распространения различают индуктивные и кондуктивные ЭМП.

Индуктивными называют электромагнитные помехи, распространяющиеся в виде электромагнитных полей в непроводящих средах.

Кондуктивными электромагнитными помехами называют помехи, распространяющиеся по токоведущим элементам электрической сети, проводящим конструкциям зданий и сооружений, и в элементах заземляющих устройств.

Также ЭМП можно классифицировать по спектральным характеристикам.

Спектр узкополосных помех близок к линейчатому – максимальный уровень приходится на одну частоту, возможно наличие гармоник малых порядков. Источниками узкополосных помех являются системы связи, системы питания на переменном токе.

К широкополосным помехам относятся разряды молнии, разряды статического электричества, возникающая коммутация индуктивной нагрузки, электромагнитные возмущения, сопровождающие работу импульсных источников питания.

Для защиты от ЭМП необходимо понимание механизмов влияния на объекты энергетики.

Существуют три основных канала передачи ЭМП: гальваническая связь, емкостная связь и индуктивная связь.

Гальваническое влияние осуществляется через общие полные сопротивления. Как правило, это сопротивления общих систем защитных и заземляющих проводов.

Уменьшение влияния ЭМП через гальванические связи обеспечивается выбором оптимальной схемы заземления оборудования или гальваническим разделением контуров.

Емкостная составляющая ЭМП воздействует на объекты энергетики через паразитные емкости между проводами или проводящими элементами, принадлежащими разным контурам и находящимися под разным потенциалом.

Для уменьшения емкостной связи осуществляется экранирование (рис. 1).

Негативное воздействие электрических полей на объекты электроэнергетики обусловлено воздействием емкостных токов в промежутке между источником поля – 1 и объектом – 2. Помещение защищаемой линии – 2 в экран – 3 сопровождается существенным уменьшением геометрической емкости C_{12} и, следовательно, емкостного тока, проходящего через нагрузку информационной линии.

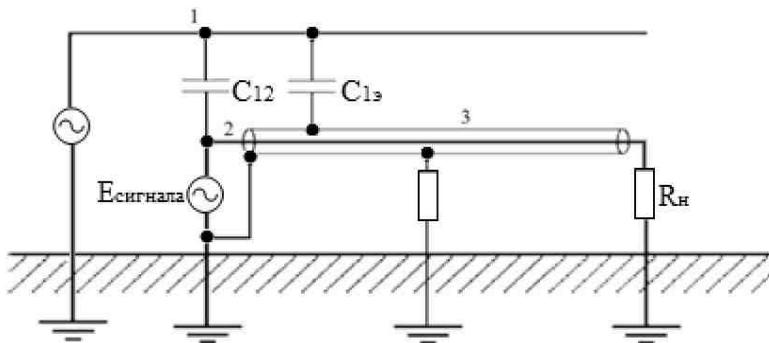


Рис. 1. Снижение помех путем экранирования

Индуктивная составляющая ЭМП обусловлена паразитными потосцеплениями между контурами.

Для уменьшения или полного устранения негативного влияния внешних магнитных полей на работу информационных линий применяют перекручивание проводов (витая пара) и экранирование. При этом, во-первых, уменьшается площадь контура, по которой проходит ток нагрузки, во-вторых, возвратный ток информационного сигнала, проходя по экрану или второму проводнику, создает магнитное поле, направленное встречно внешнему, результирующее поле уменьшается, а значит, уменьшается и уровень помех, наводимых в информационной линии.

В выполненной работе проведен анализ эффективности экранирования информационных линий, представленных витыми парами с экраном и без экрана и коаксиальными кабелями (рис. 2).

Эффективность экранирования внешних магнитных полей зависит от множества факторов (параметры линий связи, неравномерность распределения помехонесущего поля, наличие сторонних проводящих элементов и т.п.), которые достаточно сложно учесть при создании расчетной модели, поэтому при анализе эффективного экранирования информационных линий часто применяют экспериментальные способы.

Схема а) имеет большую петлю, образованную «прямым» проводом и «землей». Эта цепь подвержена прежде всего магнитному влиянию. Экран заземлен на одном конце и не защищает от магнитного влияния. Затухание для этой цепи принимается равным 0 дБ.

В схеме б) под действием внешнего поля формируется ЭДС взаимной индукции и вызываемый этой ЭДС ток шумов. Магнитное поле, создаваемое током шумов экрана, направлена встречно внешнему полю. В результате взаимной компенсации полей индукция результирующего маг-

нитного поля уменьшается, а, следовательно, снижается напряжение шумов на нагрузке.

В схеме в) использование витой пары по эффективности экранирования приближается к схеме б). Сопротивление второго сигнального проводника витой пары больше, чем сопротивление экрана, поэтому и ток шумов в нем экранирующий эффект меньше чем для коаксиальной линии.

Наибольшей эффективностью экранирования обладает линия, изображенная на схеме г). Витая пара защищает линию от внешнего магнитного, а заземленный экран – от внешнего электрического полей.

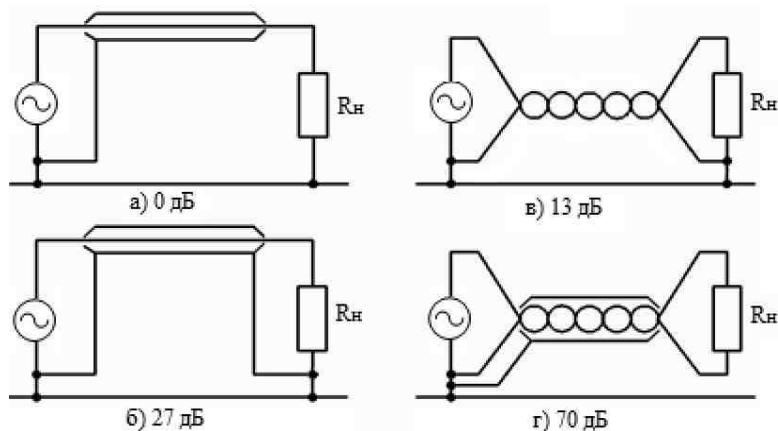


Рис. 2. Схемы защиты информационных линий от ЭМП

Для оценки эффективности экранирования информационных линий необходимо применение расчетных методов как для расчета электрической, так и магнитной составляющей. Но ввиду сложности, а иногда невозможности применения расчетных методов, используем экспериментальный прием – лабораторный стенд, с помощью которого опытным путем определяем эффективность применения различных технических способов по уменьшению влияния ЭМП.

Лабораторный стенд является экономически более выгодным способом оценки влияния ЭМП.

Разработанный лабораторный стенд позволяет моделировать воздействия широкого спектра электромагнитных возмущений на разные типы линий при разных вариантах соединения экранов с элементами информационных линий.

Библиографический список

1. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.П. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. <http://esis-kgeu.ru/ems/330-ems>.

А.Е. Рогов, студ.;
рук. С.Н. Горячкин, к.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

**ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
С РАЗЛИЧНОЙ НЕСИММЕТРИЕЙ**

На перенапряжения возникающие при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 – 35 кВ существенно влияет несимметрия, возникающая при обрыве фазы и ее замыкании на землю. Чаще всего исследования в этой области проводятся на математических моделях электрической сети с применением простых схем замещения, где нагрузка не учитывается. В данной работе сделана попытка выяснить допустимость пренебрежения подключенной нагрузкой.

Исследование влияния нагрузки на перенапряжения выполнено на физической модели участка электрической сети [1] (см. рис. 1), которая эквивалентна воздушной сети 35 кВ с емкостным током 14,8 А. Модель позволяет имитировать обрыв фазы, причем доля оставшейся в работе фазы m может изменяться от 0,1 до 1. В качестве нагрузки использовался трехфазный трансформатор с соединением обмотки звезда–треугольник. К вторичной обмотке, соединенной в треугольник, подключалась небольшая активная нагрузка. Исследование перенапряжений выполнено применительно к трем способам заземления нейтрали источника питания: нейтраль изолирована, нейтраль заземлена через дугогасящий реактор (ДГР), нейтраль заземлена через резистор. Значения напряжений измерялись со стороны источника.

Анализируя результаты проведенного исследования, можно отметить следующее.

В сети с изолированной нейтралью в отсутствие ОЗЗ подключение нагрузки не влияет на изменения напряжения в фазах и нейтрали при не-

симметрии, вызванной обрывом фазы А. Изменение доли оставшейся фазы А при обрыве m от 1 до 0,1 приводит к увеличению напряжения на фазе А до $1,43U_\phi$, а на нейтрали – до $0,42U_\phi$ (см. рис. 2).

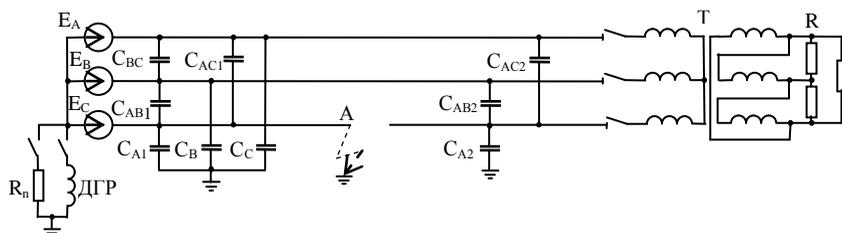


Рис. 1. Схема замещения электрической сети для несимметричных режимов

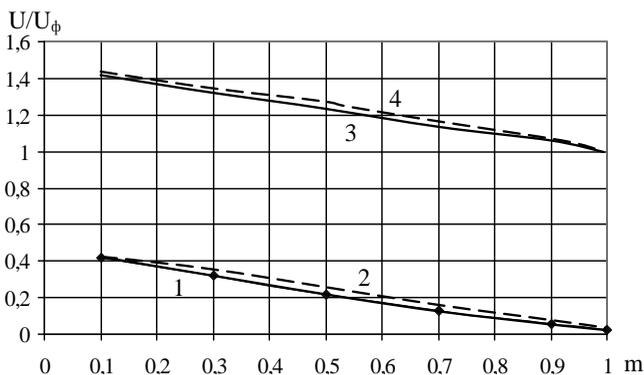


Рис. 2. Зависимости напряжения на фазе А и нейтрали от m , нейтраль изолирована: 1, 2 – напряжение на нейтрали при отключенной и включенной нагрузке соответственно; 3, 4 – напряжение на фазе А при отключенной и включенной нагрузке соответственно

При обрыве и глухом заземлении фазы А подключение нагрузки не влияет на изменения напряжения в фазах и нейтрали. Однако, подключение нагрузки увеличивает ток замыкания на землю примерно на 34 – 37 %. Зависимость тока замыкания на землю от m в пределах от 1 до 0,3 линейная. С уменьшением m от 1 до 0,3 ток замыкания на землю возрастает на 10 % при отключенной нагрузке и на 8 % при подключенной.

При обрыве фазы А и однократном дуговом замыкании на землю в месте обрыва перенапряжения на фазах и нейтрали увеличиваются при уменьшении значения m как при наличии нагрузки, так и без нее. Однако, подключение нагрузки несколько снижает эти перенапряжения. В частности, в отсутствии нагрузки изменение m от 1 до 0,1 приводит

к повышению кратности перенапряжений на фазе А от 2,2 до $3,6U_{\phi}$, а смещение нейтрали ΔU изменяется от 1,2 до $2,5U_{\phi}$. При подключении нагрузки кратности перенапряжений на фазе А изменяются от 2,2 до $3,1U_{\phi}$, а ΔU от 1,2 до $2U_{\phi}$.

В сети с компенсацией емкостного тока (наличие ДГР) обрыв фазы без ее замыкания на землю может привести к более, чем двукратным повышениям напряжения на «здоровых» фазах и к опасным перенапряжениям на нейтрали, до $1,6U_{\phi}$ (см. рис. 3, 4). С уменьшением m значения напряжений на фазах и нейтрали возрастают. Подключение нагрузки может снизить или повысить эти напряжения в зависимости от настройки ДГР.

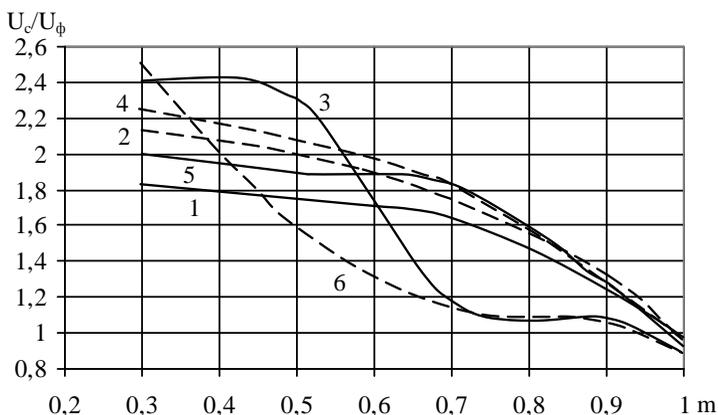


Рис. 3. Изменение напряжение на фазе С в зависимости от m и наличия нагрузки при разных настройках ДГР, ОЗЗ нет: 1, 3, 5 – зависимости $U_c/U_{\phi} = f(m)$ при настройках ДГР соответственно: $q = 1,05; 1; 0,8$; нагрузка отключена; 2, 4, 6 – то же, но с нагрузкой в конце линии

При обрыве и заземлении фазы А в сети с ДГР остаточный ток в месте замыкания на землю с уменьшением значения m увеличивается (см. рис. 5), причем степень увеличения зависит от настройки ДГР и наличия нагрузки.

В симметричном режиме ($m = 1$) подключение нагрузки не изменяет величину остаточного тока и его значения определяется только настройкой реактора – q . Однако, при уменьшении значения m влияние нагрузки на величину остаточного тока становится весьма заметным при всех рассмотренных значениях q . В частности, при $m = 0,3$ подключение нагрузки увеличивает значение тока I_o на 40 – 55 % в зависимости от настройки ДГР.

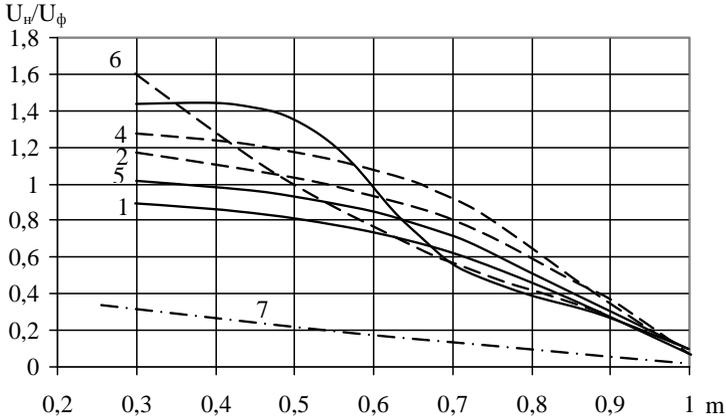


Рис. 4. Изменение напряжения на нейтрали в зависимости от m и наличия нагрузки при разных настройках ДГР. ОЗЗ нет: 1, 3, 5 – зависимости $U_n/U_\phi = f(m)$ при настройках ДГР соответственно: $q = 1,05$; 1; 0,8; нагрузка отключена; 2, 4, 6 – то же, но с нагрузкой в конце линии; 7 – $U_n/U_\phi = f(m)$ при изолированной нейтрали

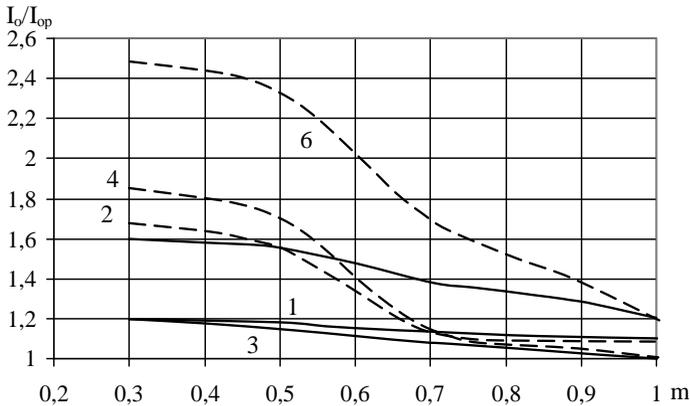


Рис. 5. Изменение остаточного тока в месте замыкания фазы А на землю в зависимости от m и наличия нагрузки при разных настройках ДГР: 1, 3, 5 – зависимости $I_0/I_{op} = f(m)$ при настройках ДГР соответственно: $q = 1,05$; 1; 0,8; нагрузка отключена; 2, 4, 6 – то же, но с нагрузкой в конце линии; I_{op} – значение остаточного тока при резонансной настройке и $m = 1$

Нарушения симметрии фаз приводит к развитию феррорезонансных процессов, появлению высших гармонических составляющих напряжения и тока, а подключение дополнительной индуктивности в виде слабо-

нагруженного трансформатора усиливает эти процессы. Синусоиды тока и напряжения искажаются. Этим объясняется резкое возрастание остаточного тока при включенной нагрузке и увеличении несимметрии сети (кривая 6 на рис. 5).

При обрыве фазы А и однократном дуговом замыкании на землю в месте обрыва перенапряжения на фазах составляют $2,2 - 2,3U_\phi$ при всех значениях m и $q = 1$ и $1,05$. При настройке $q = 0,8$ перенапряжения на фазах В и С возрастают с $2,2$ до $2,8U_\phi$ при изменении m от 1 до $0,3$. Подключение нагрузки на эти перенапряжения не влияет.

При резистивном заземлении нейтрали также, как и при изолированной нейтрали подключение нагрузки не влияет на изменения напряжения в фазах и нейтрали при несимметрии, вызванной обрывом фазы А без замыкания на землю. Кратности перенапряжений и зависимости их от m примерно такие же, как и при работе сети с изолированной нейтралью.

Значения тока замыкания на землю при обрыве фазы также, как и при изолированной нейтрали возрастают при изменении m от 1 до $0,1$.

Перенапряжения при однократном дуговом замыкании на землю слабо зависят от m и не превышают $2,4U_\phi$, что ниже соответствующих значений при изолированной или заземленной через ДГР нейтрали.

Выводы

1. Проведенные исследования еще раз подтвердили тезис: применение ДГР эффективно, если идеально симметризовать сеть; автоматизировать подстройку индуктивности ДГР к резонансному значению как в нормальном режиме, так и в режиме ОЗЗ к изменяющимся в широких пределах параметрам сети; обеспечить компенсацию не только основной, но и высших гармонических составляющих токов ОЗЗ.

2. В условиях эксплуатации выполнение вышеприведенных условий трудновыполнимо, поэтому при небольших емкостных токах замыкания на землю (до $30 - 50$ А) и наличии резервирования электроснабжения следует отдавать предпочтение заземлению нейтрали через резистор, так как в этом случае:

- перенапряжения при ОЗЗ значительно ниже, чем при изолированной нейтрали;
- перенапряжения, вызванные несимметрией сети (без ОЗЗ) значительно ниже, чем при включенном в нейтрали ДГР;
- облегчается поиск поврежденного участка сети;
- несимметрия сети, вызванная обрывом фазы, слабо влияет на кратность перенапряжений, вызванных дуговым замыканием этой фазы на землю.

3. При исследовании перенапряжений на моделях (особенно в сетях с компенсацией емкостных токов) целесообразно учитывать нагрузку, включенную после места повреждения фазы по направлению со стороны источника питания.

Библиографический список

1. **Горячкин С.Н.** Перенапряжение в электрических сетях и защита от них: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2007.

А.С. Кручинин, асп.;
рук. М.П. Цыганков, д.т.н., профессор
(ЯГТУ, г. Ярославль)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЫРЬЕВЫХ ПОТОКОВ В АСУ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Оптимизация решения задач загрузки технологических установок сырьем при оперативном управлении производством в нефтехимии и нефтепереработке во многом определяют эффективность работы предприятия в целом. Принятия решений по распределению сырьевых потоков относится к области оперативного управления производством и поддерживается средствами информационного обеспечения компьютерных систем АСУ.

Важно учитывать системный характер соответствующих задач, так как алгоритмами их решения связываются различные уровни управления предприятия, работающего в условиях колебаний спроса на продукцию и поставок сырья. В структуре иерархии уровней управления такая связь предусматривается путем формирования заданий по загрузке технологических мощностей на базе реализации встроенными средствами программного обеспечения методов и алгоритмов линейного и нелинейного программирования [1].

Предприятия по производству технического углерода являются специфическими объектами нефтехимии, для которых обычные средства параметризации программно-информационной среды АСУ для решения задач распределения и смешивания сырьевых потоков и полупродуктов оказываются неприемлемыми или нерациональными.

Последнее определяется спецификой предприятий, которая заключается в использовании подготовленных смещением углеводородных компонентов нескольких (обычно двух) сырьевых потоков для производства различных видов продукции путем термохимической переработки каждого из этих потоков.

Сырьевая смесь (поток) распределяется между группами технологических линий (установок), каждая из которых имеет назначением производство индивидуального вида продукции. Поэтому условия смешивания сырьевых компонентов, получаемых предприятием от различных поставщиков, ограничены не только общими объемами поставок сырьевых компонентов и производства требуемых видов продукта, но и подготовки смесей, качество которых должно удовлетворять производству из этих смесей сразу нескольких видов технического углерода [2].

Непосредственная параметризация для этих условий дорогостоящих программных систем типа RPMS, разработанных для предприятий нефтехимии и нефтепереработки, и хорошо интегрирующихся в системы управления верхнего уровня управления оказывается затруднительной именно по этим причинам.

Таким образом, перманентная корректировка производственных планов, загруженности тех или иных технологических линий в зависимости от наличия заказов на получение различных марок продукции, а также возможности перевода той или иной технологической установки на производство определенного вида продукта должна решаться в триединстве задач. Именно, должны объединяться задачи: (а) поставки сырьевых компонентов, (б) выполнения заказов на производство продукции и (в) оптимизации смешения поставленных сырьевых компонентов с учетом их связанности в смесях указанными выше условиями.

Если полагать ядром такого объединения оптимизацию смешения сырьевых компонентов и распределения сырьевых смесей по установкам (технологическим линиям) предприятия, то соответствующая задача должна ставиться как условно-оптимальная и алгоритмически встраиваться в информационную среду, формирующую данные о текущих (заданных) объемах сырьевых компонентов и требуемых объемах производимой продукции различного вида.

Предложена постановка такой задачи. В качестве примера критерия оптимальности принята переменная составляющая прибыли (Π) производства в целом при ограничении запаса сырьевых углеводородных компонентов и наложении допусков на производительность технологических потоков (1).

$$\Pi = \sum_j (C_j \cdot G_{TV_j} - \sum_i (C_i + C_T \cdot V_{T_{ij}}) \cdot X_{ij}) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где i – индекс (номер) сырьевого компонента, $i = 1 \dots N$, N – число сырьевых компонентов, j – индекс (номер марки) продукта, $j = 1 \dots M$, M – количество выпускаемых марок продукции, G_{TV_j} – требуемое (или ограниченное снизу) количество готового продукта (в рассматриваемом примере марки технического углерода), C_j и C_i цена единицы марки готовой продукции и компонента сырьевой смеси, C_T – цена единицы расходоуемого энергоносителя (топлива), X_{ij} – (количество используемого i -го компонента сырья для производства j -го продукта. $V_{T_{ij}}$ – норма расходования энергоносителя на производство j -го продукта из единицы сырья i -го вида. Таким образом, специфика задачи не отражается на виде критерия оптимальности (1).

Однако она проявляется в том, что показатель I_{cm} качества смеси (в примере так называемый индекс корреляции), влияющий на значения G_{TV_j} и $V_{T_{ij}}$ каждой марки, является единым для k -й сырьевой линии (потока k -ой сырьевой смеси). При обычных для технологической практики допущениях о его аддитивности по отношению к показателям I_i i -х сырьевых компонентов при их смешении получаем:

$$I_{cm_k} = (\sum_{i=1}^N N_i \cdot \tilde{O}ik^*) / (\sum_{i=1}^N N \tilde{O}ik^*), \quad (2)$$

где k – номер сырьевой линии $k = 1 \dots K$, X_{ik}^* – количество i -го компонента, направляемого в k -ю сырьевую линию.

Понятно, что $\sum_{k=1}^K K X_{ik}^* \leq X_i$, где X_i общие запасы i -го сырьевого компонента. Если конкретный (j -й) вид продукта производится из сырьевой смеси только одной (k -й) сырьевой линии то все множество J индексов $j \in J$ разбивается на K непересекающихся подмножеств J_k ($J = J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_K$) индексов $j \in J_k$. Тогда взамен обычного для задач смешения условия $\sum_{j=1}^M X_{ij} \leq X_i$ получаются $X_{ik}^* = \sum_{j \in J_k} X_{ij}$ и $\sum_{k=1}^K K X_{ik}^* \leq X_i$. Индекс j под знаком суммы $\sum_{j \in J_k} X_{ij}$ пробегает все значения, принадлежащие только подмножеству J_k выбора номеров технологических потоков для потока k -й сырьевой смеси из всего множества J этих номеров. Вид критерия в (1) конкретизируется:

$$\Pi = \sum_{j \in J} \sum_{j \in J_k} (C_j \cdot G_{TV_j} - \sum_i (C_i + C_T \cdot V_{T_{ij}}) \cdot X_{ij}). \quad (3)$$

Таким образом, на стадии проектирования производства или организации гибкого варьирования его структурой в соответствии с требованиями к объемам и номенклатуре производимой продукции можно управлять подмножествами J_k номеров j (технологических потоков производства j -й марки продукта) для выбранных значений k , тем самым воздействуя на значения прибыли Π .

Заметим, что изменением содержания подмножеств J_k учитывается и подключение или отключение некоторых из сырьевых линий. (Действительно, полагая $J_k = \emptyset$ для некоторых значений k , фактически меняем K).

Технологическая практика показывает, что объемные показатели производства каждой j -й марки получаемого продукта приблизительно линейно зависят от $I_{см}$. Учитывая это допущение и (2) запишем выражения для выхода B_{TY} продукта j -го вида на единицу израсходованного сырья, производительности G_{TY} и расхода V_T энергии соответственно:

$$\begin{aligned} B_{TY_j} &= a_j \left(\sum_{i=1}^n N_i \cdot \tilde{O}_{ik} \right) / \left(\sum_{i=1}^n N_i \tilde{O}_{ik} \right) + b_j, \\ V_{T_j} &= a_{T_j} \left(\sum_{i=1}^n N_i \cdot \tilde{O}_{ik} \right) / \left(\sum_{i=1}^n N_i \tilde{O}_{ik} \right) + b_{T_j}, \\ G_{TY_j} &= B_{TY_j} \sum_{i=1}^n N_i X_{ik}, \quad j \in J_k, \quad J_k \subset J, \end{aligned} \quad (4)$$

где $a_j, b_j, a_{T_j}, b_{T_j}$ – эмпирические коэффициенты.

Предложенная модель оптимизации состава сырьевых смесей включает критерий (3), выражения (4) и ограничения (5) на количества сырьевых компонентов и требуемый ассортимент продукции:

$$\begin{aligned} X_{ik} &= \sum_{j \in J_k} X_{ij}, \\ \sum_{k=1}^K X_{ik} &\leq X_i, \\ \sum_i B_{TY_{ij}} X_{ij} &= G_{TY_j}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решению задачи базируется на сочетании методов комбинаторики и линейного (или нелинейного для случая нелинейности выражений (4)) программирования.

Предлагаемый подход позволит интегрировать оперативно-технологический уровень системы автоматизированного управления в систему управления предприятием класса MRP или ERP.

Библиографический список

1. **Харазов В.Г.** Интегрированные системы управления технологическими процессами: учебн. пособие. – СПб.: Профессия, 2009.
2. **Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А.** Производство и использование технического углерода для резин. – Ярославль: Изд-во Александр Рутман, 2002.

Содержание

Секция 17. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Воробьев С.В.; рук. Гусенков А.В. Оценка влияния активного сопротивления грозо-защитного троса на грозоупорность воздушных линий электропередачи

Иванова А.А.; рук. Митькин Ю.А. Совершенствование системы испытаний внутренней изоляции действующих силовых трансформаторов

Кириленко А.В.; рук. Соколов А.М. Исследование характеристик высоковольтного источника питания на основе транзисторного преобразователя напряжения

Луговкин Р.Д., Уваров А.А., Наумов А.В.; рук. Вихарев А.В. Диагностика высоковольтного оборудования с большой емкостью

Масленников Н.В.; рук. Филиппов Г.А. Исследование влияния внешних электрических полей при измерении тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов

Пуркин В.В., Токарев Д.С., Луговкин Р.Д.; рук. Свиридецкий В.Г. «Умная» электротехническая лаборатория для «умных» сетей

Алексеев Д.В., Чернов И.С.; рук. Харьковский В.Б. Разработка и исследование магнитожидкостных герметизаторов для элегазовых коммутационных аппаратов

Шадриков Т.Е.; рук. Воробьев В.Ф. Применение ионной имплантации для упрочнения поверхностей материалов

Шикиль Г.Н.; рук. Словесный С.А. Анализ эффективности экранирования информационных линий

Рогов А.Е.; рук. Горячкин С.Н. Влияние нагрузки на перенапряжения в электрических сетях среднего напряжения с различной несимметрией

Кручинин А.С.; рук. Цыганков М.П. Распределение сырьевых потоков в АСУ производства технического угля

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2012»

РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ
Том 3/2

*Составитель Макаров А.В.
Компьютерная верстка Фомичевой А.В.
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.
Подписано в печать 15.05.2012. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,02.
Тираж 50 экз. Заказ № .
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.