ISSN 2224-0349

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

Сборник научных трудов
Тематический выпуск
«Энергетика: надежность и энергоэффективность»

41′2011

Издание основано Национальным техническим университетом «Харьковский политехнический институт» в 1999 году

Государственное издание Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:
Председатель
Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.
Секретарь
К.А.Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.;
Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.;
Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.;
Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;
М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.;
А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;
В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.;
И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Епифанов, канд. техн. наук, проф.;
Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
О.П. Качанов, канд. техн. наук, проф.
В.Б. Клепиков, д-р техн наук, проф.;
С.И. Кондрашов, д-р техн наук, проф.;
В.М.Кошельник, д-р техн наук, проф.;
В.И. Кравченко, д-р техн наук, проф.;
Г.В. Лисачук, д-р техн наук, проф.;
О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.;
В.И. Николаенко, канд. техн. наук, проф.
П.Г. Перерва, д-р экон. наук, проф.;
В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;
М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.;
Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор:
А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь:
Н.В. Рудевич, канд. техн. наук.

С.В. Артюх, д-р техн. наук, проф.;
А.Х. Горелик, д-р техн. наук, проф.;
В.Е. Бондаренко, д-р техн. наук, проф.;
А.В. Безпрозванных, д-р. техн. наук, доц.;
А.П. Лазуренко, канд. техн. наук, доц.;.
К.В. Махотило, канд. техн. наук, доц.;
С.Ю. Шевченко, канд. техн. наук, доц.;

Адрес редколлегии: 61002, Харьков,
ул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПИ».
Каф. ЭИКТ, тел. (0572) 7076380.

Харьков 2011

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХПІ» – №41. – 2011. – 142 с.

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів, аспірантів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов, аспирантов.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ ХПІ»;

Протокол № 10 від 01. 11. 2011 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2011

УДК 621.313.322-82

С. Ф. АРТЮХ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»
О. Б. УРМАНОВ, директор Каскад Киевских ГЭС-ГАЭС

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ КАСКАДА КИЕВСКИХ ГЭС-ГАЭС

В статье рассмотрены результаты статистического анализа отказа электрического и энергетического оборудования гидроэлектростанций Каскада Киевских ГЕС-ГАЭС. На основе этого анализа сделаны выводы о необходимой модернизации этого оборудования и направлениях его конструктивных доработок и совершенствований. Графические результаты анализа могут служить в дальнейшем их аналитического выражения.

У статті розглянуті результати статистичного аналізу відмови електричного і енергетичного обладнання гідроелектростанцій Каскаду Київських ГЕС-ГАЕС. На основі цього аналізу зроблені висновки про необхідну модернізацію цього обладнання і напрямки його конструктивних доробок і вдосконалень. Графічні результати аналізу можуть служити в подальшому їх аналітичного вираження.

In the article the results of statistical analysis of refusal of equipment of the hydroelectric power stations of Cascade of Kiev GES-GAES electric and power are considered. On the basis of this analysis the conclusions about necessary modernization of this equipment and directions of his structural revisions and perfections are done. The graphic results of analysis can serve in future their analytical expression.

Износ оборудования электростанций приводит к ухудшению его характеристик и, в конечном счете, к его отказу. С целью оценки надежности различного вида электрооборудования, установленного на электростанциях Каскада Киевских ГЭС и ГАЭС, был проведен статистический анализ выхода из строя различного оборудования за период с 1977 по 2010 год. Проведенные исследования были положены в основу модернизации гидроэлектростанций Киевского Каскада.

Прежде всего, была произведена оценка общего количества отказов оборудования гидроэлектростанций (рис. 1).

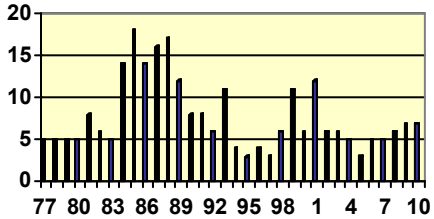


Рис. 1 – Диаграмма распределения отказов по годам (1977-2010 гг)

Анализ показал, что наибольшее количество отказов припадает на генераторы, турбины, устройства релейной защиты и автоматики и систем управления. Увеличение количества отказов в период 1984-1993 гг. объясняется износом оборудования.

В таблице 1 приведены основные причины отказа генераторов. Как видно из таблицы максимальное количество повреждений генератора происходило по причине старения изоляции обмоток статора, прослабления клинов в пазах статора и повреждения изоляции катушек полюсов ротора. Нарушение работы указанных выше деталей и узлов генератора требовали их остановки и длительного ремонта.

Таблица 1 – Причины отказов генераторов

№ п/п	Основные причины отказов генераторов	Количество
	Обрыв крепления активного железа статора	8
	Обрыв стержня демпферной обмотки ротора с выходом стержня в воздушный зазор	11
	Увлажнение обмотки статора, ротора с последующим нарушением изоляции	11
	Старение изоляции обмотки статора, прослабление клиновки пазов статора	25
	Перекрытие на токосъемных кольцах ротора	6
	Повреждения электродвигателя агрегата охлаждения генератора	28
	Повреждение изоляции катушек полюсов ротора	21
	Локальный перегрев на контактных соединениях	5
	Повреждение в трактах системы управления воздушных выключателей (до 1998 года)	9
	Отказы генераторных масляных выключателей ГАЭС (до 1997 года)	4

Коммутационные высоковольтные аппараты работали в основном нормально, а их выход из строя происходил по причине неполадок в системе их управления. Это главным образом касалось воздушных выключателей. Дальнейшая их замена на элегазовые выключатели устранила отмеченные дефекты.

Надо отметить, что значительная работа по модернизации физически и морально устаревшего оборудования станций проведена на 1-м этапе реконструкции, гидроэлектростанций продолжается и при реализации 2-го этапа модернизации.

После замены блочных и генераторных выключателей на ГЭС и ГАЭС устранены причины отказов, связанных с эксплуатацией коммутационных аппаратов.

После замены рабочих колес на 19 агрегатах количество отказов по причине повреждения уплотнений резко упало.

Результаты анализа причин отказов элементов турбинного оборудования приведены в таблице 2. Как видно из таблицы наибольшее количество повреждений приходится на уплотнения лопастей рабочего колеса и ее подшипниковых узлов. К сожалению, на протяжении анализируемого периода не удалось избежать и протечек воды из масло- и воздухоохладителей, что вызывало нарекания со стороны природоохранительных органов.

Таблица 2 – Причины отказов турбин

№ п/п	Основные причины отказов турбин	Количество
	Повреждение уплотнений лопастей рабочих колес	27
	Повреждение маслоприемников	3
	Повреждения уплотнения проходной колонны	6
	Течи воды из масло- и воздухоохладителей	10
	Повреждение уплотнений турбинных подшипников ГАЭС (до 1989 года)	3
	Повреждение подшипниковых узлов и самих агрегатов охлаждения генераторов	10

К сожалению, точное количество отказов устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) установить не удалось, но анализ показал, что основными причинами этих устройств и систем управления явились ненадежность электромеханических устройств РЗА, отсутствие надежных дублирующих устройств и старение оборудования.

Особый интерес представляет распределение отказов оборудования по отдельным агрегатам станций (рис. 2). Как видно из рисунка, распределение отказов по агрегатам не имеет определенной

закономерности и связана с условиями монтажа, режимов работы агрегатов и надежностью поставляемого оборудования.

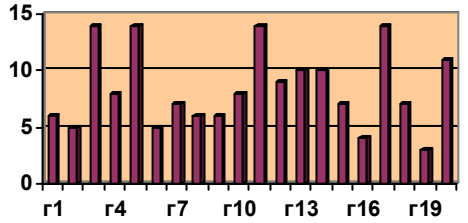


Рис. 2 – Диаграмма распределения отказов по агрегатам КГЭС

Но частота и количество отказов не в полной мере характеризуют показатели надежности оборудования. Для получения объективной оценки показателей надежности необходимо учитывать, кроме того:

1) периодичность повреждений, неисправностей и отказов;

2) время ликвидации аварии данного вида оборудования, трудозатраты и стоимость восстановительных работ;

3) периодичность проведения плановых ремонтов, связанных с выводом оборудования из работы, трудозатраты и стоимость ремонтно-эксплуатационных работ.

Анализ времени простоя оборудования показывает, что средняя продолжительность ремонта составляет 4-5 суток.

Самое продолжительное время аварийно-восстановительных работ составляют повреждения связанные:

с восстановлением повреждений изоляции обмотки статора – от недели до месяцев (особенно при замене нижних стержней);

с заменой агрегата охлаждения или двигателя – до недели;

с заменой вкладышей подшипников. Устранение дефектов подшипников – до нескольких недель;

с устранением повреждений в силовых трансформаторах – до нескольких недель;

с повреждением маслоприемников – до нескольких недель.

Так например, замена шпилек крепления «гребня» подпятника на первом генераторе потребовала 4-х месяцев, а устранение повреждения подпятника на двадцатом генераторе Киевской ГЭС продолжалось 14 месяцев.

Все это приводило к невыполнению станциями плана по рабочей мощности и недовыработке электроэнергии.

После замены системы управления на агрегатах и блоках Киевской ГЭС сократилось количество отказов в схемах управления (основные

отказы по системе управления и возбуждения имеют место на не прошедшем реконструкцию блоке №5) – 5 отказов с 2008 года.

После замены обмоток и активного железа статора и ротора практически исчезли отказы на генераторах Киевской ГЭС.

Замена электромеханических устройств РЗА на микропроцессорные привело к значительному повышению надежности оборудования. Это подтверждает правильность выбранной стратегии на модернизацию оборудования станции.

В настоящее время идет 2-й этап модернизации оборудования гидроэлектростанций Каскада. Кроме плановых работ, которые были предусмотрены в период первого этапа реконструкции ГЭС и ГАЭС, сюда включены работы, которые по ряду причин не были выполнены на первом этапе, а также проявились в процессе последующей эксплуатации станций.

Сюда в первую очередь относится замена воздухоохладителей генераторов, модернизация агрегатов охлаждения и замена их двигателей, замена сердечников полюсов их агрегатов с более надежной конструкцией демпферной обмотки.

Внедряется система вибрационного контроля на подшипниковых узлах агрегатов охлаждения и их двигателях. Проводится замена крепежа основных узлов агрегатов и широко внедряется их дефектоскопия.

Намечено оборудовать щеточные аппараты генераторов станций устройствами контроля искрения.

Ведется подготовка по внедрению частотного разворота обратимых агрегатов КГАЭС и системы контроля частичного разряда обмоток, а также состояния воздушного зазора генераторов.

Как показали исследования количество отказов и повреждений на обратимых агрегатах Киевской ГАЭС в несколько раз выше, чем на необратимых агрегатах, что объясняется более интенсивными режимами работы и тяжелыми условиями «прямого» пуска в двигательном режиме.

Данный анализ подтверждает правильность выбранной стратегии на первоочередную модернизацию обратимых агрегатов – замену обмоток статора с новым современным классом изоляции, замену полюсов ротора с обмотками, замену масло- и воздухоохладителей.

В ближайшее время планируется замена турбин с направляющими аппаратами и генераторов на необратимых агрегатах ГАЭС.

Приведенный выше анализ отказов оборудования на Каскаде Киевских ГЭС – ГАЭС послужит серьезным подспорьем заводам-изготовителям этого оборудования для устранения конструктивных недоделок и дальнейшего повышения его надежности.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

УДК 621.316.925 (075.8)

В.Н. БАЖЕНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Рассмотрены вопросы перевооружения систем электроснабжения железнодорожного транспорта средствами микропроцессорной техники. Предложен современный объем релейной защиты и автоматики совмещенных тяговых подстанций. Даны примеры по выбору параметров цифровой продольной дифференциальной токовой защиты трансформаторов типа ТРДН.

Розглянуті питання переозброєння систем електропостачання залізничного транспорту засобами мікропроцесорної техніки. Запропонований сучасний об'єм релейного захисту і автоматики суміщених тягових підстанцій. Дані приклади по вибору параметрів цифрового подовжнього диференціального струмового захисту трансформаторів типу ТРДН.

The questions of rearmament of the systems of elektrosnabzhenyya of railway transport by facilities of microprocessor technique are considered. The modern volume of relay defence and automation of the combined hauling substations is offered. Examples are given on the choice of parameters of digital longitudinal differential current defence of transformers.

Обеспечение надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей железнодорожного транспорта электроэнергией требуемого качества при минимальных затратах неразрывно связано с повышением технического уровня устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), внедрением комплексной автоматизации управления рабочими, аварийными и послеаварийными режимами. Физический и моральный ресурс электромеханических устройств РЗА, значительные затраты на обслуживание и ремонт, перевооружение основного оборудования подстанций, повышенные требования к электроэнергетике способствуют внедрению промышленных микропроцессорных устройств (МПУ). Мировой рынок МПУ предлагает методы и технические средства фирм ALSTOM, ABB, SIEMENS, AEG, SCHNEIDER, РАДИУС, МЕХАНОТРОНИКА, КИЕВПРИБОР, МИИТ (г. Москва), НИИЭФА (г. С.-Петербург), ХАРТРОН-ИНКОР (г. Харьков) и др.(1). Современные цифровые устройства РЗА интегрированы в рамках единого информационного комплекса функций релейной защиты, регулирования, измерения и управления электроустановкой. Такие устройства входят в состав автоматизированной системы управления технологическим процессом энергетического объекта, например, подстанции (АСУ ТП ПС). Микропроцессорные системы управления режимами подстанций дают существенные преимущества. Например, измерение и контроль параметров режима работы электроустановки; простота наращивания и изменения функций устройства; быстрая смена уставок РЗА; определение

вида и места повреждения; дружественный интерфейс контроля и управления (нижний уровень); снижение трудоемкости эксплуатации; уменьшение расхода на кабельно – проводниковую продукцию; минимум рабочей площади; значительное уменьшение уровня энергопотребления; постоянный автоматический самоконтроль и др.Однако,внедрение микропроцессорной РЗА связано с большими трудностями из-за: отсутствия квалифицированного обслуживающего персонала и опыта эксплуатации; недостаточности учебного материала; высокой стоимости; плохой электромагнитной совместимости с реальными условиями эксплуатации подстанции и др. С учетом возможностей микропроцессорной элементной базы предлагается следующий объем релейной защиты и автоматики совмещенной тяговой подстанции (2,3,4).

- Продольная дифференциальная токовая защита (ПДЗ) трансформатора.
- Логическая дифференциальная защита (ЛДЗ) трансформатора.
- Максимальная токовая защита на стороне высшего напряжения (МТЗ ВН) трансформатора и дополнительные защиты пуска охлаждения и блокировки регулирования под нагрузкой коэффициента трансформации трансформатора(РПН).
- Максимальная токовая защита на вводе низшего напряжения (МТЗ НН) трансформатора.
- Максимальная токовая защита секционного выключателя (МТЗ СВ).
- Дистанционная защита на стороне высшего напряжения (ДЗ ВН) трансформатора с токовой блокировкой.
- Дистанционная защита на стороне низшего напряжения (ДЗ НН) трансформатора с токовой блокировкой.
- Дистанционная защита фидеров нагрузки (ДЗ Ф).
- Защита от перегрузки (ЗП НН) на стороне низшего напряжения трансформатора.
- Дуговая защита (ДгЗ) ячеек комплектного распределительного устройства.
- Устройство резервирования в случае отказа выключателей (УРОВ).
- Логическая защита шин (ЛЗШ).
- Токовая отсечка (ТО Т) трансформатора, подключенная к выносным трансформаторам тока, если дифференциальная защита присоединена к встроенным трансформаторам тока.
- Токовая отсечка фидеров нагрузки (ТО Ф).
- Защита от замыкания на землю на стороне высшего напряжения трансформатора (ЗЗНЗ ВН).
- Сигнализация замыкания на землю на стороне низшего напряжения трансформатора (СЗНЗ НН).

- Защита от замыкания на землю на присоединениях низшего напряжения трансформатора (ЗЗНЗ Ф).
- Быстродействующая помехоустойчивая защита фидеров (БПЗ Ф).
- Квазитепловая защита (КТЗ).
- Защита минимального напряжения (ЗМН).
- Потенциальная защита (ПЗ).
- Отключение вводов трансформатора при срабатывании газовой защиты (ГЗ Т) трансформатора и устройства регулирования напряжения под нагрузкой (ГЗ РПН).
- Сигнализация срабатывания верхнего поплавка (чашечки) газовой защиты трансформатора.
- Сигнализация повышения температуры масла в трансформаторе.
- Телеблокировка (ТБ).
- Автоматическое регулирование коэффициента трансформации (АРКТ).
- Автоматическое включение резерва (АВР) на секционных выключателях.
- Автоматическое повторное включение (АПВ) на вводах трансформатора.
- Дистанционное включение и отключение выключателей.
- Блокировка включения выключателей (БВВ).
- Ускорение релейной защиты (УРЗ) при дистанционном включении выключателей и после действия АВР и АПВ.
- Определитель вида и места повреждения (ОМП).
- Местный и дистанционный ввод, хранение и отображение двух групп уставок защит и автоматики.
- Ввод, хранение и отображение эксплуатационных параметров.
- Отображение текущих электрических параметров защищаемого оборудования подстанции.
- Регистрация,хранение текущих и аварийных аналоговых электрических параметров защищаемого оборудования подстанции («Осциллографирование» и "Цифровой регистратор").
- Фиксация токов и напряжений короткого замыкания.
- Технический учет количества потребленной электроэнергии по подстанции.
- Контроль ресурсов и исправности выключателей подстанции.

На кафедре автоматизации энергосистем НТУ «ХПИ» ведутся разработки методик практических расчетов уставок микропроцессорных защит электроустановок электроснабжения потребителей железнодорожного транспорта. В качестве примера ниже приведены материалы по выбору параметров продольной дифференциальной защиты трансформатора типа ТРДН-25/115±16% кВ/6,3кВ; $U^{\%}_{к}$ =9,84; 10,5; 11,72.

К общим уставкам защиты относятся номинальные параметры трансформаторов тока и защищаемого силового трансформатора:

- Номинальный вторичный ток фазных трансформаторов тока $I_{\text{Н ВН}}=I_{\text{Н НН}}=5$ А
- Номинальный вторичный ток трансформаторов тока нулевой последовательности $I_{0\text{Н ВН}} = I_{0\text{Н НН}} = 1\ A$.
- Номинальный первичный ток трансформаторов тока стороны ВН $I_{\text{Н ВН}} = 300\ A$ (параллельное соединение двух вторичных обмоток 1ТА и 2ТА по 600/5).
- Номинальный первичный ток трансформаторов тока сторон НН трансформатора $I_{\text{Н НН1}} = I_{\text{Н НН2}} = 3000$ А (6ТА и 8ТА).
- Номинальный первичный ток трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) $I_{0\text{Н ВН}} = I_{0\text{Н НН}} = 100\ A$.
- Полярность трансформаторов тока нулевой последовательности «НОРМ» (все трансформаторы тока собраны однополярными зажимами к реле).
- Номинальная мощность трансформатора по обмоткам $S_{\text{Н ВН}} = 25000\ кВА$; $S_{\text{Н НН1}} = S_{\text{Н НН2}} = 12500\ кВА$.
- Номинальное напряжение трансформатора по обмоткам $U_{\text{Н ВН}} = 115$ кВ (среднее положение), $U_{\text{Н НН1}} = U_{\text{Н НН2}} = 6{,}3$ кВ.
- Группа соединений трансформатора: ВН – звезда, НН – треугольник (Yd11: d11).
- Базисный ток (базисный коэффициент по току) отношение номинального тока обмоток трансформатора к номинальному току трансформатора тока:

сторона ВН

$$I_{b1} = I_{\text{ВН ср}} / I_{\text{Н ВН}} = 126/300 = 0{,}42;$$

сторона НН

$$I_{b2} = I_{b3} = I_{\text{НН ср}} / I_{\text{Н НН}} = 1147/3000 = 0{,}382.$$

Уставка набираемая на реле для первой ступени дифференциального тока (в относительных единицах) :

$$I_d >= ID \cdot I_{b1},$$

где ID – ток срабатывания 1 ступени, приведенной к номинальному току трансформатора, по рекомендации завода >=0.2; I_{b1} – базисный ток стороны ВН трансформатора.

Тогда уставка, которую набираем на реле: $I_d >= 0{,}2 \cdot 0{,}42 = 0{,}084$.

Минимальная уставка, которая может быть выполнена на реле,

равна 0,15. Поэтому принимаем I_{d}>=0,15, что составляет: $ID >= 0{,}15/0{,}42 = 0{,}36$ от номинального тока трансформатора.

Первая тормозная характеристика оценивается коэффициентом торможения Р1 (наклон характеристики в зоне малых токов до $2{,}5I_{\text{Н}}$ трансформаторов тока с малыми погрешностями):

$$P1 = K_з \cdot (K' + K'') = 1{,}2 \cdot (5 + 16) = 25{,}2\%,$$

где $K_з$ – коэффициент запаса, равен 1,2;

K' – погрешность ТТ, принимается для малых токов равной 5%;

K'' – диапазон регулирования коэффициента трансформации защищаемого трансформатора в % равный суммарному диапазону сторон, равен 16%.

На реле Р1 может регулироваться от 20 до 50 %. Принимаем Р1=25%.

Вторая тормозная характеристика оценивается коэффициентом торможения Р2 (наклон характеристики в зоне больших токов к.з. более 2,5 номинального тока с большими погрешностями ТТ):

$$P2 = K_з \cdot (K_{\text{ап}} \cdot K_1' + K'') = 1{,}2 \cdot (1{,}5 \cdot 10 + 16) = 37\%,$$

где $K_{\text{ап}}$ – коэффициент учитывающий рост погрешности за счет апериодической составляющей, принимаем равной 1,5;

K_1' – погрешность трансформаторов тока, принимается для больших сквозных токов равной 10% при условии выбора трансформаторов тока по кривым 10% погрешности.

Р2 может регулироваться в пределах от 40 до 100%. Принимаем Р2=40%.

Уставка второй ступени дифференциального тока выбирается по максимуму из двух условий:

Первое условие – отстройка от максимального тока небаланса при сквозном токе к.з.

$$ID >>= K_з (K_{\text{ап}}' \cdot K_1' + K'') \cdot I_{\text{КЗ МАКС}} = 1{,}2(3 \cdot 0{,}1 + 0{,}16) \cdot 832 = 460\text{А},$$

где $K_{\text{ап}}'$ – коэффициент учитывающий рост погрешности за счет апериодической составляющей, принимается равным 3;

$I_{\text{КЗ МАКС}}$ – сквозной ток к.з. в максимальном режиме на стороне низкого или среднего напряжения.

Второе условие – отстройка от броска тока намагничивания:

$$ID >>= 6I_{\text{НОМ}} = 6 \cdot 126 = 756\text{А}.$$

Из двух условий выбирается наибольшее $ID = 756$А.

Вычисляется уставка второй ступени защиты:

$$I_d >>= \frac{ID}{I_{\text{НВН}}} = \frac{756}{300} = 2{,}52.$$

Полученное значение округляется до ближайшего целого числа, которое и задается в качестве уставки $I_d >>= 3$. Данная уставка может регулироватся в пределах от 1 до 30 $I_{\text{Н ВН}}$.

Блокировка защиты током второй гармоники применяется для отстройки от бросков тока намагничивания. Уставка оценивается отношением тока блокировки $ID(2f_{\text{н}})$ к основному дифференциальному току и регулируется в пределах 10-50%.

Предлагается: $ID(2f_{\text{н}}) = 12\%$. Способ блокировки может быть выбран (ВКЛ): пофазная блокировка или (ВКЛ АВС): блокировка всех фаз наибольшим током второй гармоники, (ОТКЛ): блокировка отключена.

Режим блокировки током пятой гармоники применятся для предотвращения ложной работы защиты от повышенного тока намагничивания во время подачи на обмотку трансформатора напряжения значительно выше номинального. Способ блокировки может быть выбран (ВКЛ): пофазная блокировка или (ВКЛ АВС): блокировка всех фаз наибольшим током пятой гармоники (ОТКЛ): блокировка отключена.

Обычно проверку чувствительности микропроцессорной защиты не выполняют. Это обусловлено тем, что уставка 1 ступени защиты при к.з. за трансформатором мала ($I_d \geq 0{,}15$ от номинального тока трансформатора тока на стороне ВН ($I_{\text{Н ВН}}$ = 300 А)).

Более грубая вторая ступень, отсечка ($I_d\rangle\rangle = 3$) также не проверяется, так как предназначена для работы при больших токах к.з. на стороне ВН трансформатора.

При необходимости можно рассчитать чувствительность защиты аналитическим методом.

Чувствительность в зоне малых токов к.з., на стороне НН силового трансформатора.

$$K_{\text{ч ВН}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^{(3)}_{K-2,\text{ мин ВН}}}{\left(I_d> \cdot I_{\text{Н ВН}}\right)} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 480}{(0{,}15 \cdot 300)} = 9{,}2 .$$

Коэффициент чувствительности должен быть не менее 2.

Чувствительность в зоне больших токов к.з, на стороне ВН силового трансформатора.

$$K_{\text{ч ВН}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^{(3)}_{K-1,\text{ мин ВН}}}{\left(I_d>> \cdot I_{\text{Н ВН}}\right)} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3000}{(3{,}0 \cdot 300)} = 2{,}89 > 1{,}2 .$$

Чувствительность 2 ступени должна быть не менее 1,2.

Представляет интерес сравнить данную защиту с защитой на реле типа РНТ-560 (5). Уставка защиты выбирается максимальной по двум условиям. Первое условие отстройки от небаланса при максимальном внешнем к.з.:

$$I_{\text{сз}} = K_{\text{з}} \cdot (K_{\text{I}}' + K'') \cdot I_{\text{кз макс}} = 1{,}3 \cdot (0{,}1 + 0{,}16) \cdot 832 = 281 \text{ А} .$$

Второе условие отстройки от бросков намагничивающего тока:

$$I_{\text{сз}} = K_{\text{з}} \cdot I_{\text{ВН}} = 1{,}3 \cdot 126 = 164 \text{ А} .$$

Принимаем: $I_{\text{сз}} = 280$ А

Чувствительность в зоне малых токов:

$$K_{\text{ч}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^{(3)}_{K-2,\text{ мин ВН}}}{I_{\text{сз}}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 480}{280} = \frac{416}{280} = \frac{OX}{OS} = \frac{1{,}38}{0{,}93} = 1{,}48 < 2 .$$

По ПУЭ $K_{\text{ч}}$ должен быть более 2. Поэтому защита с РНТ не может быть применена.

Выводы. Сформулированы основные задачи совершенствования системы релейной защиты и автоматики тяговых подстанций на базе промышленных микропроцессорных устройств. Показаны возможности микропроцессорной дифференциальной токовой защиты трансформаторов подстанции и предложены рекомендации по выбору параметров защиты на примере трансформатора типа ТРДН-25/115±16% кВ/6,3кВ.

Список литературы:1.*Фигурнов Е.П.* Релейная защита.Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей транспортных и других вузов / *Е.П. Фигурнов*– К. : Транспорт Украины, 2004. – 565 с. **2**. *Шабад М.А.* Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / *М.А. Шабад*. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 280 с. **3.** *Федосеев А.М.* Релейная защита электроэнергетических систем. Учебник для вузов / *А.М. Федосеев, М.А. Федосеев.* – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 528 с. **4.** *Андреев В.А.* Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учебник для вузов по спец.»Электроснабжение» / *В.А. Андреев.*– М. : Высш.шк.,1991. - 496 с. **5.** Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Релейний захист» / уклад. *В.М. Баженов, М.М. Одегов.* – Х. : УкрДАЗТ, 2006. – 40 с.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

УДК 621.314

Д. Н. БАКЛАЙ, ассистент, НТУ «ХПИ»;
О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БАЗ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «СИРЕНА

В статье рассмотренны принципы и методы организации баз данных в информационно-аналитической системе «Сирена» предназначенной для диагностики высоковольтного маслонаполненного оборудования. Предложенная структура движения информационных потоков для построения единственной информационной корпоративной системы на базе информационно-аналитической системы «Сирена».

У статті розглянуті принципи та методи організації баз даних в інформаційно-аналітичній системі «Сирена» призначеної для діагностики високовольтного маслонаповненого обладнання. Запропонована структура руху інформаційних потоків для побудови єдиної інформаційної корпоративної системи на базі інформаційно-аналітичної системи «Сирена».

In the article the principles and methods of the databases in the information-analytical system "Sirena" intended for the diagnosis of high-voltage oil-filled equipment. The structure of the movement of information flows to build a unified information system based on corporate information-analytical system "Sirena".

Введение. Мировой опыт ведущих электроэнергетических компаний свидетельствует о широком использовании систем искусственного интеллекта (ИИ) [1] таких как экспертные и информационно-аналитические системы, которые отличаются принципами построения, методами обработки данных и различными функциональными возможностями.

В настоящее время коллективом авторов кафедры «ПЭЭ» НТУ «ХПИ» разрабатывается информационно-аналитическая система «Сирена». Она предназначенная для автоматизированного ведения паспортных данных и данных периодических испытаний высоковольтного маслонаполненного оборудования, а так же проведения диагностических экспертиз по результатам периодических испытаний с возможностью получения оценки состояния контролируемого оборудования и рекомендаций по его дальнейшей эксплуатации на уровне эксперта-человека в области диагностики. Система работает с базой данных в локальной сети предприятия в режиме клиент-сервер. В качестве сервера данных используется промышленная СУБД InterBase, а в качестве пользователей (клиентов) могут выступать любые промышленные ЭВМ, подключенные к локальной сети предприятия и имеющие соответствующие полномочия для доступа к информации.

Цель статьи – Предлагается способ построения единой корпоративной информационной системы на основе информационно-аналитической системы «Сирена», используемой для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования. Приведены принципиальные положения организации реляционных баз данных, потоков данных и систем управления базами данных.

Анализ публикаций. Общая структура систем основанных на использовании ИИ [2] состоит из следующих основных компонентов:
– решателя (интерпретатора);
– базы данных (БД);
– базы знаний (БЗ);
– компонентов приобретения знаний;
– объяснительного компонента;
– диалогового компонента.

Одним из основных компонентов любой информационно-аналитической ИАС является база данных (БД) и механизмы систем управления базами данных (СУБД). Базами данных называют электронные хранилища информации, доступ к которым осуществляется с помощью одного или нескольких компьютеров. Обычно БД создается для хранения и доступа к данным, содержащим сведения о некоторой предметной области, то есть некоторой области человеческой деятельности или области реального мира. Принято считать, что использование концепции баз данных позволяет:

- повысить надежность, целостность и сохранность данных;
- сохранить затраты интеллектуального труда;
- обеспечить простоту и легкость использования данных;
- обеспечить независимость прикладных программ от данных (изменений их описаний и способов хранения);
- обеспечить достоверность данных;
- обеспечить требуемую скорость доступа к данным;
- стандартизовать данные в пределах одной предметной области;
- автоматизировать реорганизацию данных;
- обеспечить защиту от искажения и уничтожения данных;
- сократить дублирование информации за счет структурирования данных;
- обеспечить обработку незапланированных запросов к хранимой информации;
- создать предпосылки для создания распределенной обработки данных.

Структура информационных потоков ИАС «Сирена». Разрабатываемая ИАС предполагает поддерживание принятие решений и обеспечение выполнения задач различных категорий пользователей, работающих с информацией о состоянии оборудования на всех уровнях.

Система может работать как на одном рабочем месте, так и в случае распределенной базы данных. Блоки информационно-аналитической системы установлены в районах энергосетей (РЭС), на сетевых предприятиях (ПЭС), в химлаборатории (ХЛ) и в управлении энергокомпании. Потоки движения информации и ее обработку можно представить в виде трехуровневой схемы (см. рис. 1).

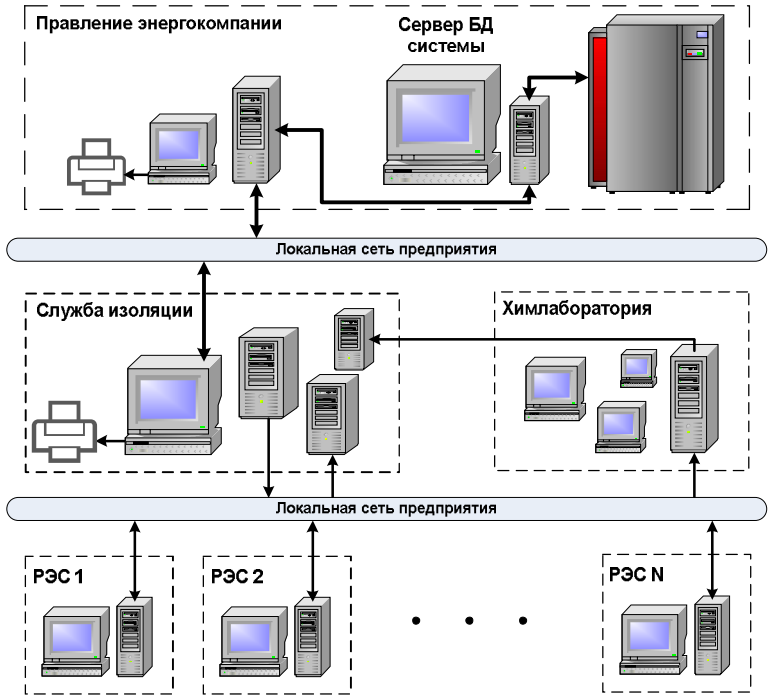


Рис.1 – Схема движения потоков информации в ИАС «Сирена»

На нижнем уровне персонал, проводящий испытания и измерения оборудования, заносит полученные результаты в базу данных (БД), в которой также отражается информация о внешних воздействиях на оборудование (перенапряжениях, перегрузках и т.д.) и эксплуатационных мероприятиях (доливки масла, замена узлов оборудования и т.д.). В химической лаборатории проводятся хроматографический анализ, растворенных в масле газов (ХАРГ) и полный физико-химический анализ масла (ФХАМ). Результаты этих измерений инженер-химик заносит в БД информационно-аналитической системы. На основании этих данных система осуществляет верификацию и интерпретацию, выдает вид

дефекта, степень его развития. Инженер-химик, оценив выводы, сделанные системой, фиксирует свое заключение в БД. Результаты ХАРГ и ФХАМ вместе с заключением инженера-химика транслируются на сервер БД энергосистемы и БД службы изоляции.

На среднем уровне с системой работают инженер по диагностике и начальник службы изоляции. Проводится необходимая обработка данных измерений: сравнение с результатами испытаний на заводе или при монтаже оборудования с данными предыдущих измерений параметров и соотношений между ними; отслеживается динамика изменений параметров и соотношений между ними. Инженер по диагностике может просмотреть результаты расчета параметров и объяснение постановки диагноза. Анализ информации ведется как в текстовом, так и в графическом виде (устройство вывода на печать).

На верхнем уровне проводится общий по энергосистеме анализ брака и отказов оборудования, осуществляется сравнительный анализ служб изоляции предприятий. Так как с системой работают несколько категорий пользователей, то присутствует четко организованная технология работы с информацией. Непротиворечивость и целостность данных обеспечивается единой кодировкой справочников по структуре энергосистемы, формирующих адрес оборудования, а также сервисных справочников, выражающих политику эксплуатации и диагностики. Справочная информация редко обновляется, формируемся на уровне управления энергосистемы, дублируется на второй и третий уровни, в основном, без права редактирования. Для трансляции информации между уровнями можно делать выборки по виду измерения, типу оборудования, месту установки и времени проведения измерения. При слиянии поступившей информации с сервером БД системы (после транспортирования между уровнями в обоих направлениях) происходит проверка информации на непротиворечивость с учетом приоритета достоверности, оценивается полнота внесенной информации в конкурирующих записях, исключается тавтология записей.

Организация СУБД и БД в ИАС «Сирена». В настоящее время существует достаточно большое количество программных систем, позволяющих создавать и использовать базы данных. В зависимости от расположения программы, использующей данные, и самих данных, а также способа разделения данных между несколькими пользователями различают локальные (dBASE, FoxPro, Access, Paradox) и удаленные (Interbase, Oracle, Sysbase, Infomix, Microsoft SQL Server) базы данных [3]. При этом различают три основных вида программных средств, предназначенных для создания, наполнения, обновления и удаления баз данных: промышленные универсального назначения, промышленные специального назначения и разрабатываемые для конкретного заказчика. Специализированные СУБД создаются для управления базами данных

конкретного назначения — бухгалтерские, складские, банковские и т.д. Универсальные СУБД не имеют четко очерченных рамок применения, они рассчитаны «на все случаи жизни» и, как следствие, достаточно сложны и требуют от пользователя специальных знаний. Как специализированные, так и универсальные промышленные СУБД относительно дешевы, достаточно надежны (отлажены) и готовы к немедленной работе, в то время как заказные СУБД требуют существенных затрат, а их подготовка к работе и отладка занимают значительный период (от нескольких месяцев до нескольких лет). В зависимости от расположения отдельных частей СУБД различают локальные и сетевые (файл-серверные, клиент-серверные и распределенные) СУБД.

Принимая во внимание структурную организацию и иерархию управления, принципы ведения баз данных на отечественных энергетических компаниях, основные тенденции и подходы при создании баз данных и систем управления базами данных при разработке ИАС «Сирена» была принята промышленная универсального назначения клиент-серверная (рис. 2) СУБР Borland Database Engine (BDE) и удаленная БД InterBase производства одноименной корпорации.

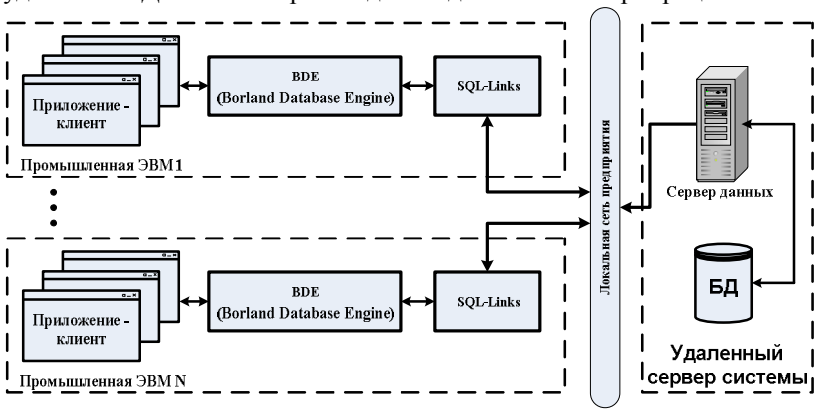


Рис. 2 – Архитектура СУБД Клиент-Сервер

Клиент-серверные системы значительно снижают нагрузку на сеть, так как данные удаленной БД находятся на удаленном компьютере (сервер системы). Каждый уровень управления обладает своими функциональными и информационными возможностями. Программа работы с удаленной базой данных состоит из двух частей: клиентской и серверной. Клиентская часть программы, работающая на компьютере пользователя, обеспечивает взаимодействие с серверной программой: посредством запросов, передаваемых на удаленный компьютер, предоставляет доступ к данным. Серверная часть программы,

работающая на удаленном компьютере, принимает запросы, выполняет их и пересылает данные клиентской программе. Запросы представляют собой команды, представленные на языке Structured Query Language (SQL) — языке структурированных запросов. Программа, работающая на удаленном сервере, спроектирована таким образом, чтобы обеспечить одновременный доступ к информации нескольким пользователям. При этом для обеспечения доступа к данным вместо механизма блокировки файлов используют механизм транзакций. Транзакция — это некоторая последовательность действий, которая должна быть обязательно выполнена над данными перед тем, как они будут переданы. В случае обнаружения ошибки во время выполнения любого из действий вся последовательность действий, составляющая транзакцию, повторяется снова. Таким образом, механизм транзакций обеспечивает защиту от аппаратных сбоев и сохранность данных в БД.

После анализа особенностей автоматизируемой области деятельности следует приступить, возможно, к самому важному этапу — проектированию БД, которое заключается в определении состава полей ее таблиц и связей между таблицами. От того, насколько тщательно проведен анализ и насколько грамотно спроектирована БД, в существеннейшей мере зависит эффективность будущей СУБД и ее полезность для пользователя. Электронные таблицы и файлы, которые, используются в работе, имеют серьезные ограничения. Прежде всего, стараясь поддерживать отдельные блоки информации, разбросанные по всему предприятию, и управлять ими, можно столкнуться с проблемами доступности и точности данных. А когда данные хранятся в разных форматах на разных компьютерах, трудно обеспечить безопасность и конфиденциальность, не говоря уже о резервном копировании, восстановлении и непрерывной доступности данных. Поэтому в процессе разработки базы данных для ИАС «Сирена» была принята реляционная модель данных. Реляционная база данных представляет собой гораздо более мощный инструмент во всех отношениях, особенно в области аналитики. Реляционная база данных – по существу это БД, в которой данные представлены в виде таблиц (рис. 3). Реляционная таблица [4] состоит из пересекающихся строк (другие названия – запись, сущность) и столбцов (другие названия - поле, атрибут). Термин «relation» (отношение) – это формальное название определенного вида таблицы. Реляционные базы данных позволяют многими способами манипулировать данными, так что можно выбирать все записи, отвечающие определенному критерию, ссылаться из одних таблиц на другие и редактировать все записи целиком. Для обеспечения целостности и минимализации занимаемого объема памяти к реляционным таблицам предъявляют следующие требования:

- данные в ячейках таблицы должны быть структурно неделимы;

- данные в одном столбце должны быть одного типа;
- каждый столбец должны быть уникальным;
- столбцы размещаются в произвольном порядке;
- строки размещаются также в произвольном порядке;
- столбцы имеют уникальные наименования.

Главными «строительными блоками» реляционной БД являются сущности (entity). Термин сущность обычно используется для обозначения любого различимого объекта, который может быть представлен в БД (объект, местоположение или предмет, сведения, о которых подлежат сбору и хранению). Сущности группируются по их общим свойствам. Набор сущностей (entity set) это именованная совокупность сущностей, объединенных общими свойствами. Таким образом, таблица содержит группу связанных сущностей, по этой причине термины таблица и набор сущностей чаще всего означают одно и тоже.

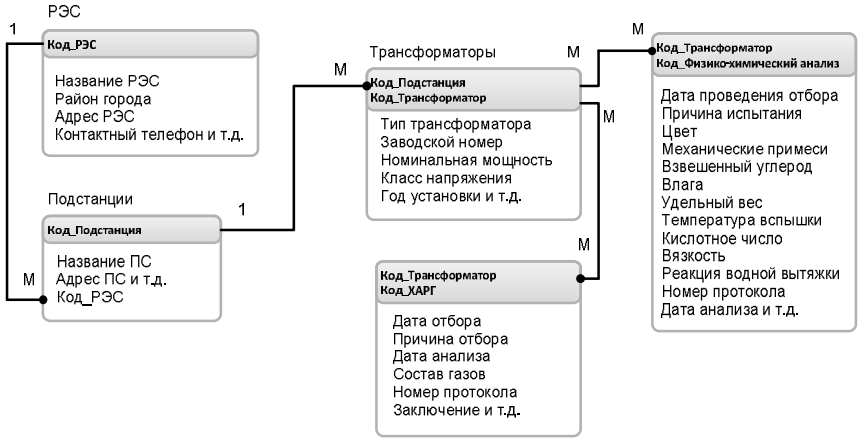


Рис. 3 – Реляционная структура БД ИАС «Сирена»

Каждая сущность имеет некоторые свойства, называемые атрибутами. Например, на рис. 3 набор сущностей с именем «Подстанции» содержит множество сущностей «подстанция» с атрибутами Код_РЭС, Название ПС, Контактный телефон и др. Ключи – центральная составляющая реляционных таблиц. Ключи определяют функциональные зависимости, то есть другие атрибуты зависят от ключа и могут, следовательно, быть найдены по его значению. Каждая строка таблицы должна иметь первичный ключ, который представляет собой атрибут или комбинацию атрибутов, которые уникально идентифицируют все остальные атрибуты в любой строке. Поскольку первичный ключ должен быть уникален, в нем для обеспечения целостности не допускаются пустые значения. Несмотря на то, что все

таблицы независимы, их можно связать при помощи совместно используемых атрибутов. Связи в БД можно классифицировать по типу «один-ко-одному» (1:1), «один-ко-многим» (1:M) и «многие-ко-многим» (M:M). Связь «один-ко-одному» означает, что данная сущность может быть связана только с одной другой сущностью и т. д. Связь 1:M практически идеальна для реляционной модели и является в ней основным кирпичиком.

Выводы.

1. Разрабатываемая ИАС «Сирена» строиться в соответствии с структурой и иерархией управления энергокомпанией и имеет четко выделенные уровни. Каждый уровень обладает своими функциональными и информационными возможностями, уровнем обобщения, анализа и защищенности информации в соответствии с существующей иерархией организации эксплуатации электрооборудования;
2. Как и большинство ЭС [5,6,7,8], работающих с базами данных (БД) ИАС «Сирена» использует промышленную универсального назначения СУБД InterBase в локальной сети предприятия в режиме клиент-сервер с применением реляционной модели данных, что позволяет значительно снизить стоимость разработку ИАС и при этом обеспечить сохранность данных, разгрузить информационные каналы связи предприятия по средствам удаленного сервера системы.
3. Применение реляционной модели хранения данных дает возможность свободного доступа к данным по средствам SQL запросов, что немаловажно при работе с большим количеством разнообразной информации.

Список литературы: 1. *Шутенко О. В.* Анализ функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностики состояния высоковольного маслонаполненного оборудования / *О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – Т. 1, вип. 3. – С. 45-52. **2.** *Баклай Д. Н.* Анализ принципов построения экспертных систем для оценки состояния изоляции маслонаполненного оборудования / *Д. Н. Баклай* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – Т. 1, вип. 1. – С. 180-194. **3.** Delphi 7 Наиболее полное руководство / *А. Хоменко, В. Гофман, Е. Мещеряков и др*. – П. : БХВ-Петербург, 2008. – 1200 с. **4.** *Рудикова Л. В.* Базы данных. Разработка приложений: посібник / *Л. В. Рудикова*. – П. : БХВ-Петербург, 2006. – 496 с. **5.** *Попов Г.В.* Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов / *Г.В. Попов, А.В. Ватлецов, С.С. Аль-Хамри* // Электротехника. – 2003. – № 8. – С. – 5–11. **6.** *Игнатьев Е.Б.*Оценка состояния электрооборудования на основе программного комплекса "Диагностика+" в режиме on-line / *Е.Б. Игнатьев*, *Е.Ю.Комков*, *Г.В.Попов* – VIII Симпозиум "Электротехника 2010". Сборник тезисов докладов, доклад 4.13, М.: ВЭИ. – 2005. **7.** *Давиденко И.В.* Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / *И.В. Давиденко*, *В.П. Голубев*, *В.И. Комаров*, *В.Н. Осотов* // Электрические станции. – 1997. – №6. – С. – 25–27. **8.** *Давиденко И.В.* Система компьютерной диагностики маслонаполненного оборудования в рамках энергосистемы / *И.В. Давиденко*, *В.П. Голубев*, *В.И. Комаров*, *В.Н. Осотов*, *С.В. Туркевич* // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 52–56.

Поступила в редколлегию 30.09. 2011

УДК621.316.93

С.К.БЕРЕЗКА, зав. лабораторией, НТУ "ХПИ"
А.А. МИНЧЕНКО, канд.техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ ИСПЫТАНИЙ

Розглянуті математичні аспекти удосконаленої моделі грозозахисту повітряних ліній електропередачі напругою 110 кВ і вище та результати, що отримані при її випробуванні.

Рассмотрены математические аспекты усовершенствованной модели грозозащиты воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше и результаты, полученные при её испытании

Mathematics realization of lightning defense model of overhead transmission lines of 110 кV and more high voltage and its test rezults are discussed.

Постановка проблемы. Расчет ожидаемого числа грозовых отключений воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением 110 кВ и выше, отвечающий условиям физики процесса при разряде молнии, для которых независимые случайные величины амплитуда и максимальная крутизна волны тока молнии достигаются в различные моменты времени при условии нулевой производной тока молнии в начальный момент времени, требует разработки соответствующей методики или совершенствования существующих. Совершенствование математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом ведется с использованием современных вычислительных операций и должно базироваться на результатах соответствующих численных экспериментов.

Анализ публикаций. Наиболее полная методика расчета грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом изложена в "Руководстве" [1]. Постановка задачи совершенствования этой методики путем представления в ней формы волны тока молнии, отвечающая условиям физики процесса при разряде молнии, была отображена в работах [2,3]. В работах [3,4] предложена аппроксимация формы волны тока молнии, отвечающая условиям процесса при разряде молнии в ВЛ, а в работе [5] изложен подход к решению задачи совершенствования моделирования грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом при условии указанной выше аппроксимации.

Цель статьи. Изложение основных положений совершенствования моделирования грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом и результатов вычислительных экспериментов.

Основная часть.

Принимаем взаимно независимыми амплитуду и максимальную крутизну тока молнии для предложенной в работах [3,4] аппроксимации формы волны импульса. Используем логарифмически нормальное распределение токов молнии [1,6]. Плотность вероятности распределения амплитуды тока молнии:

$$f(I_{\text{M}}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg I}\sqrt{2\pi} I_{\text{M}}} \exp\left[-\frac{\left(\lg I_{\text{M}} - \overline{\lg I_{\text{M}}}\right)^2}{2\sigma^2_{\lg I}} \right], \qquad (1)$$

где $\overline{\lg I_{\text{M}}}$ – математическое ожидание логарифма амплитуды тока молнии;

$\sigma_{\lg I}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма амплитуды.

Аналогично [1,6] для максимальной крутизны импульсов тока молнии:

$$f(A_{\text{M max}}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg A}\sqrt{2\pi} A_{\text{M max}}} \exp\left[-\frac{\left(\lg A_{\text{M max}} - \overline{\lg A_{\text{M max}}}\right)^2}{2\sigma^2_{\lg A}} \right], \qquad (2)$$

где $\overline{\lg A_{\text{M max}}}$ – математическое ожидание логарифма максимальной крутизны тока молнии;

$\sigma_{\lg A}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма максимальной крутизны.

Тогда вероятность попадания значений амплитуды тока молнии в интервал $[I_{\text{M}\,i-1}, I_{\text{M}\,i}[$ будет равна [7]:

$$P(I_{\text{M}\,i-1} \le I_{\text{M}} < I_{\text{M}\,i}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg I}\sqrt{2\pi}} \int_{I_{\text{M}\,i-1}}^{I_{\text{M}\,i}} \frac{1}{I_{\text{M}}} \exp\left[-\frac{\left(\lg I_{\text{M}} - \overline{\lg I_{\text{M}}}\right)^2}{2\sigma^2_{\lg I}} \right] dI_{\text{M}} \ . \qquad (3)$$

Аналогично, вероятность попадания значений максимальной крутизны тока молнии в интервал $[A_{\text{M max}\,i-1}, A_{\text{M max}\,i}[$ будет равна

$$P(A_{\text{M max } i-1} \le A_{\text{M max}} < A_{\text{M max } i}) =$$

$$= \frac{\lg e}{\sigma_{\lg A}\sqrt{2\pi}} \int_{A_{\text{M max } i-1}}^{A_{\text{M max } i}} \frac{1}{A_{\text{M max}}} \exp\left[- \frac{\left(\lg A_{\text{M max}} - \overline{\lg A_{\text{M max}}}\right)^2}{2\sigma^2_{\lg A}} \right] dA_{\text{M max}} . \quad (4)$$

Определяя вероятности по выражениям (3) и (4) для каждого из задаваемых интервалов $[I_{\text{M }i\text{-}1},\ I_{\text{M }i}[$ и $[A_{\text{M max }i\text{-}1},\ A_{\text{M max }i}[$ на принятых интервалах вариаций значений величины I_{M} и $A_{\text{M max}}$, производим, тем самым, аппроксимацию кривой логарифмически нормального распределения дискретной ступенчатой функцией. При этом длины указанных задаваемых интервалов равны соответствующим шагам дискретизации $\Delta I_{\text{M}} = I_{\text{M }i} - I_{\text{M }i\text{-}1} = \text{const}$ и $\Delta A_{\text{M max}} = A_{\text{M max }i} - \text{A}_{\text{M max }i\text{-}1} = \text{const}$ ($i = \overline{1,n}$). Тогда количество попаданий из общего числа испытаний N в каждый из интервалов $[I_{\text{M }i\text{-}1}, I_{\text{M }i}[$ и $[A_{\text{M max }i\text{-}1}, A_{\text{M max }i}[$ будет равно соответственно:

$$N_{\Delta I_M} = P(I_{M\ i-1} \le I_M < I_{M\ i})N , \quad (5)$$

$$N_{\Delta A_M \text{ max}} = P(A_{M \text{ max } i-1} \le A_{M \text{ max}} < A_{M \text{ max } i})N . \quad (6)$$

Таким образом в задаваемом числе статистических испытаний N стохастической модели перекрытия гирлянды изоляторов ВЛ имеем на каждом шаге дискретизации величин I_{M} и $A_{\text{M max}}$ вполне определенное число значений I_{M} (аналогично и $A_{\text{M max}}$), т.е. $\text{N}_{\Delta \text{Iм}}$ и $\text{N}_{\Delta \text{Aм max}}$, обеспечивая тем самым используемую плотность вероятности распределения токов молнии.

Моделирование процесса перекрытия линейной изоляции производиться следующим образом. На ЭВМ организуется генерация пары значений I_{M} и $A_{\text{M max}}$. Из базы данных ЭВМ выбираются соответствующие этой паре значения I_0, T_1 и T_2, позволяющие воспроизвести предложенную в работах [3,4] модель волны тока молнии; для отмеченной совокупности значений величин известны также $\tau_{\text{ф}}$ (длительность фронта) и $t_{A\text{м}}$(момент времени, при котором крутизна тока молнии максимальная). Эта модель следующая [3,4]:

$$i_{\text{м}}(t) = I_0 \left[e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} - \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{t}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right], \quad (7)$$

где I_0 – постоянная, определяемая амплитудой тока;
T_1, T_2 – постоянные, определяемые возрастанием и спадом волны тока.

Момент перекрытия линейной изоляции при $t=t_{\text{пер}}$ устанавливается по критерию выполнения известного условия, что сумма импульсного напряжения $U_{\text{имп}}(t)$ и рабочего напряжения провода $u_{\text{р}}(\varphi)$ достигает разрядного напряжения линейной изоляции $U^{+}_{\text{разр}}(t)$ [1].

В усовершенствованнной математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи 110 кВ и выше требуется, как и в исходной методике [1], решение детерминированной задачи распределения тока молнии между опорой и тросом как при прямых ударах в опору, тока и в трос в середине пролета. Здесь используются те же схемы замещения, что и в работе [1], но модель волны тока молнии отвечает условиям уравнения (7). Тогда при каждом статистическом испытании стохастической модели перекрытия гирлянды изоляторов ВЛ установление распределения тока молнии в соответствии с моделью (7) между опорой и тросом производится путем решения дифференциальных уравнений явным одношаговым методом первого порядка, предложенным Эйлером.

Следует отметить, что разрядное напряжение линейной изоляции $U^{+}_{\text{разр}}(t)$ определяется вольт-секундной характеристикой в соответствии с работой [8] как

$$U^{+}_{\text{разр}}(t) = \frac{U^{+}_{50\%}}{1{,}145}\sqrt{1 + \frac{3{,}1}{t_{\text{пред}}}}, \quad (8)$$

где $U^{+}_{50\%}$ – 50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянды при полной волне для положительной полярности на проводе (приблизительно соответствующее $\tau_{\text{пред}} = 20$ мкс), кВ;
$t_{\text{пред}}$ – предразрядное время, мкс.

Расчет 50%-ного разрядного напряжения для импульса положительной полярности с длительностью фронта τ_{Φ} более длительности фронта стандартного импульса (1,2/50 мкс) производится в соответствии с работой [1] по выражению

$$U^{+}_{50\%}(\tau_{\phi}) = U^{+}_{50\%}\left(0{,}45 + \frac{9}{\tau_{\Phi}^{0{,}9} + 15}\right). \quad (9)$$

При генерации из базы данных ЭВМ значений I_{M}, $A_{\text{M max}}$, I_0, T_1 и T_2 известны также значения τ_{Φ} и $t_{\text{Ам}}$. Принимая допущение, что вольт-секундная характеристика линейной изоляции определяется по выражению (8) не только для случаев с $\text{U}^{+}_{50\%}$, но и при $\text{U}^{+}_{50\%}(\tau_{\Phi})$, производится вычисление по выражению (9) 50%-ного разрядного напряжения с длительностью фронта τ_{Φ}, значение которого генерировано

из базы данных ЭВМ в составе указанных ранее значений. Далее, по выражению (8) в процессе пошагового наращивания времени $t = t_{\text{пред}}$ определяется вольт-секундная характеристика линейной изоляции и проверяется выполнение условия ее перекрытия.

Таким образом в усовершенствованной математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше, в отличие от работы [1], используется одна и та же разрядная характеристика как при прямых ударах в опору, так и в трос в середине пролета. В работе [1] в первом случае используется вольт-секундная характеристика гирлянд изоляторов для разрядов на косоугольном фронте, которая получена с использованием 50%-ных разрядных напряжений при испытательном импульсе стандартной формы, а во втором – 50%-ное разрядное напряжение для импульса положительной полярности. Учитывая то, что в усовершенствованной модели грозозащиты ВЛ определение длительности фронта импульса тока молнии производится по выполнению условия $i_{\text{м}}(t)\big|_{t=\tau_{\text{ф}}} = I_{\text{м}}$, отличающегося от определения длительности фронта косоугольного импульса в работе [1], использование разрядного напряжения $U^{+}_{\text{разр}}(t)$ в соответствии с выражениями (8) и (9) представляется обоснованным.

Выполненное совершенствование модели грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом предполагается использовать при выборе наибольшего значения сопротивления растеканию заземляющих устройств опор ВЛ. Поэтому совершенствование не коснулось рассмотрения прорывов молнии через тросовую защиту на провода ВЛ; число прорывов от значения указанного выше сопротивления не зависит.

Необходимое число статистических испытаний математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше установлено на основе вычислительного эксперимента. По исходным данным ВЛ 110 кВ на опорах ПБ110-8 при ударе молнии в опору в зависимости от числа испытаний получен разброс вероятности перекрытия изоляции на опоре (см. рис. 1).

Из вычислительного эксперимента следует, что число статистических испытаний при моделировании грозозащиты ВЛ напряжением 110 кВ и выше должно быть не менее 10^5.

Выводы.

Усовершенствованная математическая модель грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше с тросом реализуется на основе современных вычислительных операций и, по сравнению с исходной моделью, более адекватна отображает процессы при поражениях молнией ВЛ.

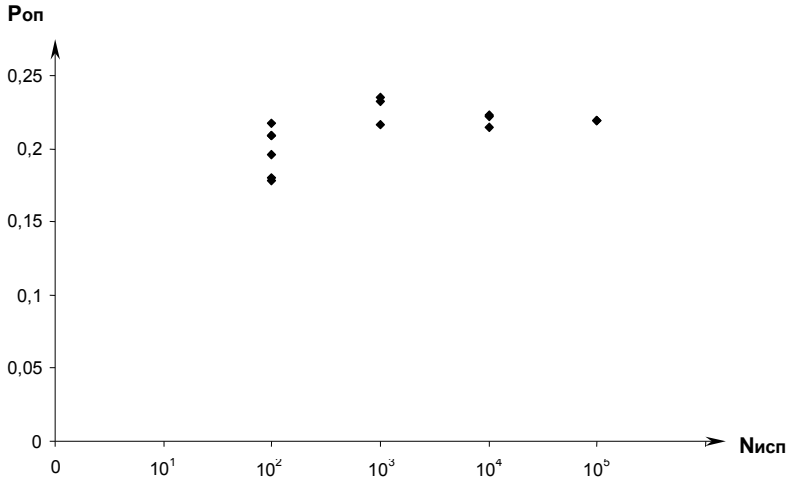


Рис. 1 – Разброс вероятности перекрытия изоляции на опоре

Список литературы:

1. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений, РД 153-34.3-35.125-99. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999. – 184 с. **2.** *Кадомская К.П.* Моделирование волны тока молнии при расчётах грозоупорности электрических сетей / *К.П. Кадомская , А.А. Рейхердт* // Электричество. –2006. –№11. – С.17–23. **3.** *Гуль В.И.* Моделирование грозовых перекрытий на воздушных линиях электропередачи с использованием метода статистических испытаний / *В.И. Гуль, С.К. Березка* // Энергетика и электрификация. – 2007. – №6. – С. 35–39. **4.** *Березка С.К.* Модель волны тока молнии при расчетах грозоупорности воздушных линий электропередачи / *С.К. Березка, А.А. Мінченко* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 11 (186), Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». – 2011. – С. 41-43. **5.** *Березка С.К.* Удосконалювання моделювання грозозахисту повітряних ліній електропередавання напругою 110 кВ та вище / *С.К. Березка, А.А. Мінченко* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, ч. II ,01-03 червня 2011. - Харків, НТУ "ХПІ". – 2011. –195 с.. **6.** *Костенко М.В.* Грозозащита подстанций и электрических машин высокого напряжения. Серия "Электрические станции и сети" (Итоги науки и техники) / *М.В. Костенко, И.М. Богатенков , Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов* // М.:ВИНИТИ,1987. – №13.– 112 с. **7.** *Гнеденко Б.В.* Математические методы в теории надежности / *Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев* // – М.: Наука, 1965. – 524 с. **8.** Руководящие указания по расчету грозозащиты воздушных линий электропередачи 3–750 кВ, 10890тм-Т1 (проект). Л: НИИПТ, 1982 – 187с.

Поступила в редколлегию 06.10.2011

УДК 621.315

А.М.БОЙКО **,** магістр, НТУ «ХПІ»
Г.В. БЕЗПРОЗВАННИХ*,* д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКРАНУВАННЯ ВИТИХ ПАР

Встановлено вплив товщини та матеріалу захисної полімерної оболонки витих неекранованих пар на випромінювання електричної складової електромагнітного поля. Показано ефективність застосування металевого екрану в порівнянні з полімерними захисними оболонками.

Установлено влияние толщины и материала защитной оболочки витых неэкранированных пар на излучение электрической составляющей электромагнитного поля. Показана эффективность применения металлического экрана в сравнении с полимерными защитными оболочками.

Influence of a thickness and material of a protective cover twisted non shielded steam on radiation of an electric component of an electromagnetic field is established. Efficiency of application of the metal screen in comparison with polymeric protective covers is shown.

Вступ.

Мережеві кабелі випускаються як неекранованими, так і екранованими. При цьому співвідношення між ними становить 84 % до 16 % відповідно [1 – 2].

Єдиної відповіді на питання: застосовувати неекрановану або екрановану пару – немає. Це питання повинно вирішуватися виходячи з конкретних техніко-економічних умов на стадії проектування мережі, враховуючи всі фактори, що впливають на ***проблему електромагнітної сумісності та екологічної безпеки*** при застосуванні полімерних матеріалів в кабелях.

У першу чергу необхідно, знаючи очікуваний частотний діапазон роботи кабелю, врахувати взаємні впливи між окремими парами, які можна суттєво зменшити введенням індивідуальних екранів, а також визначити ступінь можливих зовнішніх електромагнітних впливів (включаючи між кабельні перешкоди), які можна значно зменшити застосуванням загального екрана сердечника.

Струми та напруги, що виникають в витій парі внаслідок взаємних і зовнішніх впливів, пов'язані з тим, що два провідники несиметричні відносно джерела перешкод (перебувають на різній відстані від нього). Прихильники застосування неекранованих систем наполягають на тому, що для вирішення проблеми впливів на пари необхідно удосконалювати конструкцію та технологію виготовлення витих пар. Дійсно, однаковий діаметр жил та товщина ізоляції, стабільна відстань між провідниками та крок скрутки по довжині кабелю різко зменшують електромагнітний вплив на виті пари.

Ще один стандартний аргумент на користь неекранованих рішень полягає в тому, що застосування кабелів з екранами вимагає обов'язкового і якісного заземлення. Для цього потрібна мережа телекомунікаційного заземлення. При ненадійному заземленні струми будуть багаторазово протікати по екрану, частково відбиваючись на його кінцях і випромінюючи електромагнітні хвилі в простір. В такому випадку екран стає вторинним джерелом випромінювання – своєрідною антеною. У такому випадку не тільки захист витої пари від впливу зовнішніх джерел буде неефективним, але і значно збільшиться електромагнітний вплив кабелю на інші, прокладені поруч, кабелі та різні електронні пристрої, що перебувають у тому ж приміщенні.

Істотне випромінювання енергії сигналів у простір значно ускладнює проблеми захисту інформації. Крім того, екран збільшує первинні та вторинні параметри передачі [3]. Окрім впливу на параметри передачі екран витої пари може створювати ефект рамкової антени, що призводить до виникнення тих, чи інших рівнів випромінюваних електромагнітних полів, які можуть перевищити нормативні вимоги. Екран кабелю повинно бути заземлений на шині телекомунікаційної системи заземлення (Telecommunications Ground Busbar, TGB). Різниця потенціалів між екраном та землею не повинна перевищувати 1 В, а електричний опір між екраном та землею – 4 Ом на робочому місці.

Сучасний реальний рівень випромінювань в офісних середовищах значно виріс: робота радіотелефонів, систем мікросотового зв'язку – призводять до появи електромагнітних наводок в декілька вольт на метр. Так, наприклад, радіотелефон визиває наводки в рядом розташованих кабелях до 10 В/м, радар – до 100 В/м.

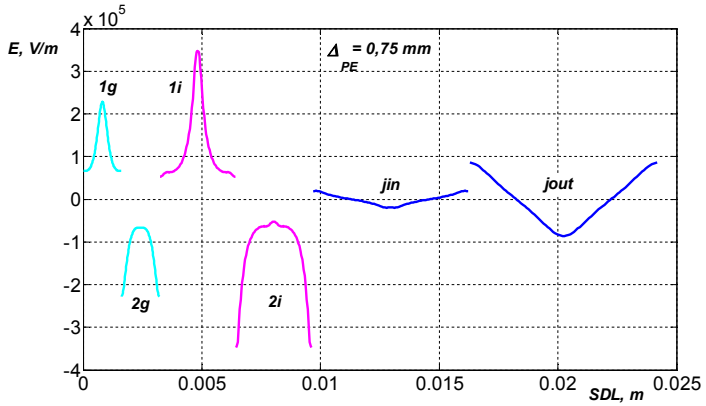
Для високошвидкісних мереж необхідно застосовувати екрановані рішення [3]: спостерігається зменшення впливу зовнішніх електромагнітних полів (загасання екранування) від 35 – 45 дБ на низьких частотах до 30 – 35 дБ на високих частотах відповідно. Це практично повністю вирішує проблему впливу зовнішніх джерел, включаючи між кабельні перешкоди та випромінювання в простір. В конструктивному плані використовуються плівкові та у вигляді оплітки екрани. Але вартість екранованої витої пари на 40 –100% більша в порівнянні з неекранованою.

Механізм електромагнітного екранування полягає у відбитті електромагнітних хвиль від границь розділу діелектрик – метал та метал – діелектрик, а також у загасанні електромагнітної хвилі в товщі екрану.

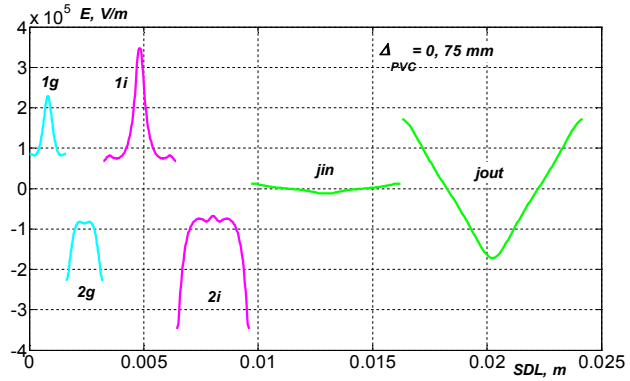
Ціль статті: аналіз ефективності екранування неекранованих витих пар в залежності від матеріалу та товщини захисної полімерної оболонки.

Вплив матеріалу та товщини захисної оболонки на напруженість електричного поля неекранованої витої пари.

Виконані розрахунки напруженості електричного поля витої пари з поліетиленовою ізоляцією при застосуванні захисної полімерної оболонки на основі наповненого поліетилену (PE) (відносна діелектрична проникненість ε дорівнює 3,0) (рис. 1а) та полівінілхлоридного пластикату (PVC) (відносна діелектрична проникненість ε дорівнює 6,5) (рис. 1б) показують, що при однаковій товщині полімерних оболонок в разі застосування PVC напруженість електричного поля на внутрішній поверхні менше, а на зовнішній – більше, практично, в 2 рази в порівнянні з PE.

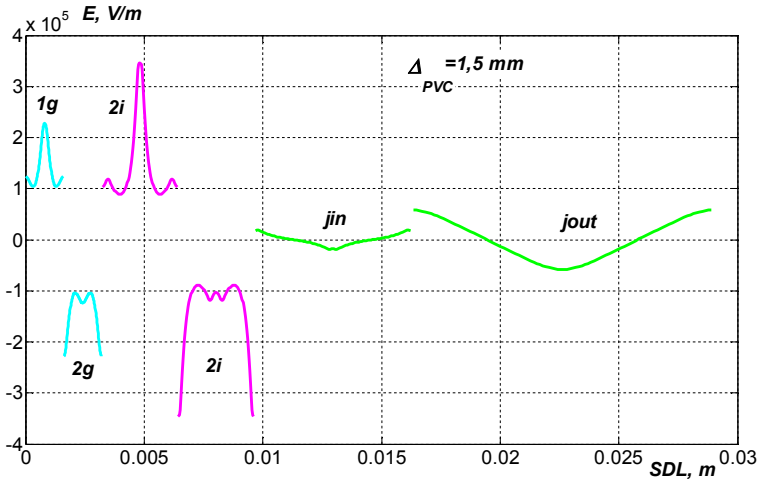


а)

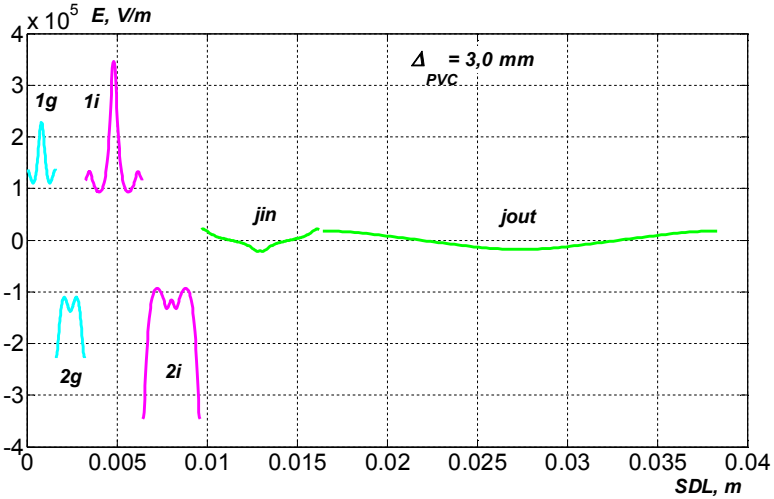


б)

Рис. 1 – Розгортка напруженості електричного поля по поверхням струмопровідних жил (1g, 2g), ізоляції (3i, 4i), внутрішній (jin) та зовнішній (jout) поверхні неекранованої витої пари: а – полімерна оболонка на основі наповненого поліетилену; б – полімерна оболонка на основі полівінілхлоридного пластику



а)



б)

Рис. 2 – Вплив товщини полімерної полівінілхлорідної захисної оболонки витої пари на рівень електричної складової власного електромагнітного випромінювання: а – товщина полімерної оболонки 1,5 мм; б – товщина полімерної оболонки 3 мм

Отже, при застосуванні полівінілхлорідної оболонки рівень електричної складової електромагнітного випромінювання (ЕМВ) в оточуючий простір буде значно вищий, аніж при застосуванні оболонки

на основі поліетилену. Це пов'язано з більшим значенням відносної діелектричної проникності PVC оболонки.

Зменшити рівень власного ЕМВ витої неекранованої пари можливо за рахунок збільшення товщини оболонки (рис.2): при збільшені товщини полімерної оболонки в 2 рази напруженість електричного поля на зовнішній поверхні зменшується, в середньому, в 5 разів (порівняйте рис.2а та 2б). Збільшення товщини оболонки призводить, з однієї сторони, до збільшення масо-габаритних розмірів та собівартості кабелю, а з другої, – до зменшення гнучкості витих пар – однієї з найсуттєвіших переваг над екранованими.

Але полімерні оболонки незапобігають захисту від зовнішніх електромагнітних перешкод.

Для забезпечення вимог за електромагнітною безпекою виті пари екрануються. Передача сигналів на частотах вище 100 МГц викликає потужні електромагнітні поля навколо кожної пари: найменші відхилення в конструкції витої пари від симетричності призводять до різкого зростання перехідних перешкод та виходу параметрів взаємних впливів за межі норм.

Оцінка ефективності екранування витої пари.

Екранування захищає виту пару як від впливу зовнішніх електромагнітних полів, так і локалізує (значно зменшує в залежності від екрану) власне внутрішнє випромінювання витої пари.

Наявність металевого екрану призводить до спотворення електричного поля в конструкції кабелю (рис.3). Напруженість електричного поля на поверхні металевого екрану значно перевищує напруженість на внутрішніх поверхнях полімерних захисних оболонок (порівняйте рис.1, 2 та 3).

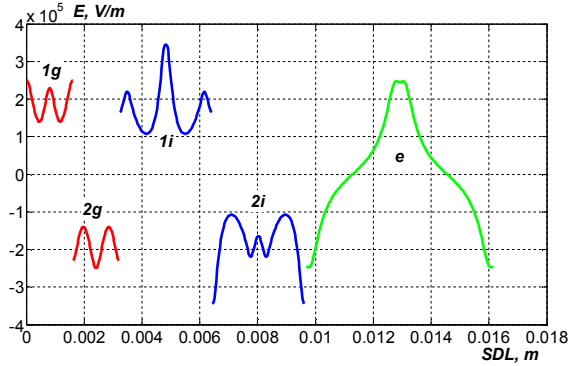
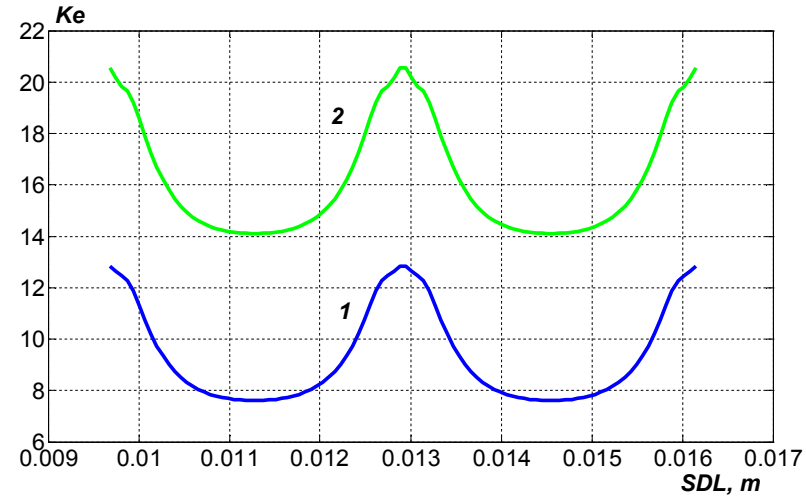
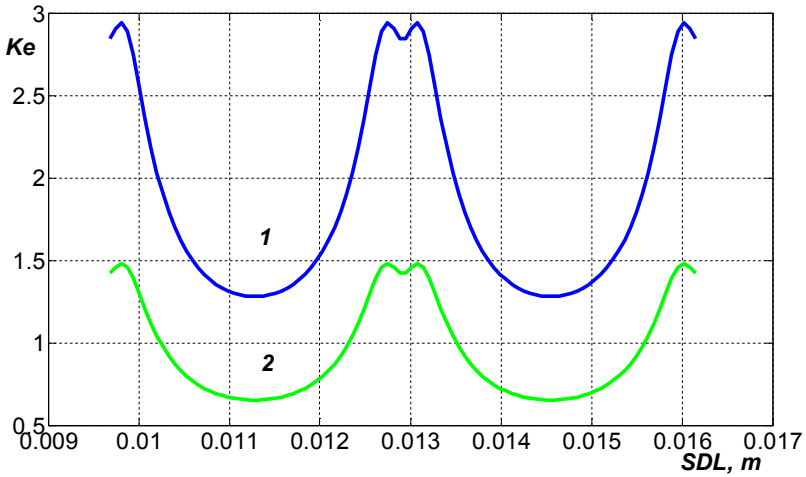


Рис. 3 – Розгортка напруженості електричного поля по поверхням струмопровідних жил (1g, 2g), ізоляції (3i, 4i) та металевого екрану (e)



а)



б)

Рис. 4 – Коефіцієнти послаблення електричної складової при заміні полімерних оболонок металевим екраном: а – для внутрішніх поверхонь; б – для зовнішніх поверхонь

Ефективність екранування – ступінь послаблення електричного поля – визначається через відношення діючих значень напруженості електричного поля в даній точці простору при наявності екрану (E_e) та відсутності (E_o) [4]:

$$K_E = \frac{E_e}{E_o},$$

де K_E –коефіцієнт послаблення за електричною складовою.

На рис.4 наведено розрахункові коефіцієнти послаблення при заміні поліетиленової (крива 1) та полівінілхлорідної (крива 2) оболонки металевим екраном. Видно, що ефективність екранування вища при заміні поліетиленової оболонки в порівнянні з полівінілхлорідною.

Висновки.

1. В неекранованих витих парах зменшити рівень витоку електричної енергії можливо за рахунок використання полімерних оболонок на основі наповнених поліетиленів. Це вирішує також проблему використання матеріалів на основі галогенів, зокрема хлору, та стеарату свинцю, які містяться в PVC оболонці. Останній використовується в якості стабілізатору для підвищення температури розпаду. В PVC пластикатах можуть також вводитися вуглекислий свинець, кальцій, кадмій, барій. Свинець та кадмій відносяться до заборонених з шести небезпечних речовин відповідно до директиви RoHS: *Restriction of use of Hazardous Substances – обмеження використання небезпечних речовин.* Дана директива обмежує використання потенційно небезпечних речовин в електротехнічному та електронному обладнанні, встановлює точні границі дозволених концентрацій цих речовин.

2. Ефективність екранування залежить від матеріалу полімерної оболонки: чим менша відносна проникненість матеріалу захисної оболонки, тим вище коефіцієнт послаблення електричної складової ЕМВ.

3. Застосування металевих екранів в витих парах потребує якісного заземлення та мережі телекомунікаційного заземлення.

Список літератури: 1. International Standard ISO/IEC 11801 Information Technology – Generic Cabling for Customer Premises. – 1995. – 104 p**. 2**. TSB -36.Technical Systems Bulletin/ Additional Cable Specifications for Unshielded Twisted Pair Cables.-5p**. 3.** *Бойко А.М.* Обгрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем/ *А.М. Бойко, Г.В. Безпрозванних* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. -Т.1, вип. 2. – С. 22 – 30. **4**. *Шапиро Н.Д.* Основы теории электромагнитного экранирования / *Н.Д. Шапиро* – Л. :Энергия. – 1975. – 112 с.

Надійшла в редколегію 03.10.2011

УДК 621.311

Ю.Н. ВЕПРИК, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ УСТАНОВКИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

У роботі представлений алгоритм вибору оптимальних місць установки додаткових компенсуючих пристроїв з метою зниження втрат потужності в електричних мережах, який базується на урахуванні ступеня завантаження елементів мережі і часткових похідних від втрат по реактивних потужностях компенсуючих пристроїв, що встановлені.

В работе представлен алгоритм выбора оптимальных мест установки дополнительных компенсирующих устройств с целью снижения потерь мощности в электрических сетях, основанный на учете степени загрузки элементов сети и частных производных от потерь по реактивным мощностям устанавливаемых компенсирующих устройств.

The algorithm of choice of optimum places of setting of additional compensating devices is in-process presented with the purpose of decline of losses of power electric networks, based on the account of load of network elements and partials from losses on the reactive-powers of the set compensating devices.

Постановка проблемы. Развитие электрических сетей сопровождается увеличением потерь электрической энергии, отпускаемой в сеть. Это обусловлено увеличением средних расстояний между источниками и потребителями электроэнергии, отставанием сетевого строительства и недостатком в установке средств компенсации реактивной мощности. Поэтому задача снижения потерь мощности и энергии в электрических сетях с развитием энергосистем сохраняет свою актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций. Снижение потерь мощности и энергии в электрических сетях является важной составляющей общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Одним из средств решения этой задачи является оптимизация параметров режима электрической сети – управление потоками мощности, регулирование напряжений в сети, установка и регулирование устройств компенсации реактивной мощности и др. [1,2].

Цель, задачи исследования. Компенсация реактивной мощности в сетях – одно из возможных и эффективных мероприятий, обеспечивающих снижение потерь в электрических сетях, однако эффективность этого мероприятия в значительной степени зависит от того, насколько удачно выбраны места установки дополнительных компенсирующих устройств (КУ) в электрической сети. В то же время алгоритмы поиска наиболее эффективных мест установки

дополнительных компенсирующих устройств еще требуют разработки и совершенствования, так как при неправильном выборе мест установки снижается их эффективность, что ведет к увеличению затрат без получения заметного положительного эффекта.

Основной материал исследований. Если электрическую сеть представить узловыми уравнениями в форме баланса мощностей:

$$P_i = g_{ii}U_i^2 - \sum_{j=1}^{N_i} U_i U_j (b_{ij}\sin\delta_{ij} - g_{ij}\cos\delta_{ij}) = P_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j), \qquad (1)$$

$$Q_i = g_{ii}U_i^2 - \sum_{j=1}^{N_i} U_i U_j (b_{ij}\cos\delta_{ij} - g_{ij}\sin\delta_{ij}) = Q_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j),$$

где P,Q,U,δ – мощности (активные и реактивные) и напряжения (модули и углы), то потери активной мощности П при передаче электрической энергии по сети можно определить как алгебраическую сумму активных мощностей, генерируемых и потребляемых во всех N узлах сети:

$$П = \sum_{j=1}^{N_i} P_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j). \qquad (2)$$

Потери мощности ΔP_{ij} в каждой ветви ij и в целом по сети (2) являются явными функциями узловых напряжений U_i, U_j и одновременно неявными функциями мощностей S_i в узлах сети, так как последние через уравнения баланса мощностей (1) определяют U_i, U_j.

Изменения реактивных мощностей в узлах Q_i приводят к изменениям узловых напряжений сети в соответствии с (1). Следствием этого, в свою очередь, является изменение потерь мощности в сети, как это видно из (2). При этом изменения реактивных мощностей должны соответствовать располагаемому диапазону регулирования источников и не вызывать недопустимых отклонений напряжения в узлах сети:

$$Q_{\min} \le Q_i \le Q_{\max}; U_{\min} \le U_i \le U_{\max} \quad . \qquad (3)$$

Выражения (1) – (3) составляют математическую формулировку оптимизационной задачи, которая состоит в том, чтобы определить места установки и мощность дополнительных КУ, при которых обеспечивается минимум целевой функции (2) и соблюдаются ограничения в форме равенств (1) и неравенств (3). В решении этой общей задачи целесообразно выделить две более узких: 1) выбор места установки дополнительных КУ в сети; 2) определение оптимальных мощностей КУ

в выбранных узлах. В данной статье речь идет о решении первой из этих двух задач.

Целевая функция (2) и уравнение (1) выражаются непрерывными дифференцируемыми функциями, поэтому решение задачи возможно на основе применения градиентных методов. Производные от потерь мощности П по параметрам режима U_i, δ_i можно получить дифференцированием функции (2):

$$\frac{\partial П}{\partial U_i} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial P_j}{\partial U_i}; \qquad \frac{\partial П}{\partial \delta_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i}. \qquad (4)$$

Слагаемые $\frac{\partial P_i}{\partial \partial_i}; \frac{\partial P_j}{\partial \partial_i}; \frac{\partial P_i}{\partial U_i}; \frac{\partial P_j}{\partial U_i}$ в (4) являются элементами матрицы Якоби, используемой в расчете нормального режима сети. Приращение мощностей ΔP_i, ΔQ_i и параметров режима ΔU_j, $\Delta \delta_j$ связаны между собой соотношениями:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j}\Delta\delta_j + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j}\Delta U_j = \Delta P_i; \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j}\Delta\delta_j + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j}\Delta U_j = \Delta Q_i \end{aligned} \qquad (5)$$

получаемыми из (1). Поэтому приращения ΔU_j, $\Delta \delta_j$ модулей и углов векторов узловых напряжений, вызванные включением дополнительной реактивной мощности в одном из узлов сети можно определить, решив линеаризованную систему уравнений (5), в которой вектор-столбец заданных величин в правой части содержит лишь один ненулевой элемент – приращение реактивной мощности ΔQ_j в узле i.

Зная производные (4) и вычислив приращение модулей и углов узловых напряжений при включении дополнительной мощности ΔQ_j в узле i, в соответствии с теорией неявных функций [3] можно определить приращение потерь ΔП, вызванное включением ΔQ_j:

$$\Delta П_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial П}{\partial U_j}\Delta U_j + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial П}{\partial \delta_j}\Delta\delta_j. \qquad (6)$$

Тогда отношение приращения потерь ΔП к приращению реактивной мощности ΔQ_j в узле i при малых ΔQ_j можно принять равным соответствующей производной:

$$\frac{\partial П}{\partial Q_i} \cong \frac{\Delta П}{\Delta Q_i}. \qquad (7)$$

Чтобы определить производные от потерь при изменении реактивной мощности в каждом из N узлов сети, нужно один раз получить матрицу Якоби, выполнить ее обращение и, задавая в правой части уравнений (5) приращение поочередно в каждом из N узлов, вычислить соответствующие им векторы приращения $\Delta\delta_i$, ΔU_i, а затем – приращение потерь по выражению (6).

Расчеты производных от потерь $П$ по реактивным мощностям, выполненные для реальных электрических сетей 110-330 кВ, показывают, что численные значения этих производных изменяются в очень широких пределах – от $1*10^{-5}$ до $1*10^{-1}$. Для иллюстрации в Табл. 1 приведены результаты таких расчетов для фрагмента электрической сети 330-110 кВ Северной энергосистемы.

Таблица 1 – Влияние дополнительных КУ на потери мощности в сети

Номер узла компенсации	Потери активной мощности $П_{КОМ}$, МВт	Снижение потерь $(\Delta П_{НОР})/\Delta Q$, , МВт/МВАр	Номера узлов в порядке приоритетности
10	3,5924	0,0094	6
11	3,5931	0,0087	9
17	3,5928	0,0090	8
18	3,5919	0,0099	1
20	3,5923	0,0095	5
21	3,5921	0,0097	3
22	3,5920	0,0098	2
24	3,5933	0,0085	10
25	3,5926	0,0092	7
26	3,5923	0,0095	4

Потери активной мощности в исходном нормальном режиме составляют $П_{НОРМ}$ = 3,6018 МВт. В Таблице приведены потери после установки дополнительных компенсирующих устройств для ряда узлов сети, удельное (на 1 МВАр) снижение потерь, номера узлов в порядке приоритетности (первые 10 узлов).

Величину производной $\frac{\partial П}{\partial Q_i}$ можно считать показателем эффективности установки дополнительных КУ в узле *i*, так как она характеризует снижение потерь мощности в соответствующем узле на 1 МВАр установленной дополнительной реактивной мощности. Следовательно, при выборе места установки дополнительных КУ с целью снижения потерь мощности в электрической сети предпочтение нужно отдавать узлам с наибольшим значением $\frac{\partial П}{\partial Q_i}$ и по мере исчерпания возможностей регулирования в таких узлах переходить (если это экономически оправдано) к узлам с меньшими $\frac{\partial П}{\partial Q_i}$.

Расчеты по компенсации с реактивной мощности в электрических сетях показывают также, что если судить только по величине частных производных $\frac{\partial П}{\partial Q_i}$, то среди узлов, которые следовало бы выбрать в качестве мест установки дополнительных КУ, могут оказаться узлы, расположенные как в сильно-, так и в слабо загруженной части сети. Показателем, характеризующим степень загруженности линии можно считать отношение мощности P_{ij} , передаваемой по ВЛ, к её натуральной мощности $P_{нат}$ (коэффициент загрузки ВЛ):

$$k_з = \frac{P_{ij}}{P_{нат}} \qquad (8)$$

на том основании, что при передаче по ВЛ мощностей, больше натуральной ($k_з$>1) потребление реактивной мощности превышает её генерацию линией, что приводит к увеличению потерь активной мощности. Поэтому при выборе места установки дополнительных КУ необходимо учитывать также загрузку сети и из узлов с одинаковыми или близкими $\frac{\partial П}{\partial Q_i}$ предпочтение отдавать узлам, к которым примыкают линии с коэффициентом загрузки $k_з$>1.

В соответствии с изложенным для выбора оптимальных мест установки дополнительных КУ при решении оптимизационной задачи (1) – (3) представляется целесообразным использовать следующий алгоритм:

1. Выполнить расчет исходного режима и выделить загруженную часть сети;
2. Сформировать матрицу Якоби, соответствующую линеаризованным узловым уравнениям баланса мощностей по

напряжению исходного установившегося режима, и получить обратную матрицу Якоби;

3. Выполнить расчет частных производных от потерь мощности в электрической сети по модулям и углам узловых напряжений по формулам (4);

4. Выполнить расчет приращений модулей и углов ΔU_i, $\Delta \delta_i$ узловых напряжений, соответствующих дополнительной реактивной мощности ΔQ_i в каждом из узлов сети по уравнению (5);

5. Выполнить расчет приростов потерь $\Delta П_i$ в загруженной части сети, вызванных дополнительными КУ и производных от потерь по мощности дополнительных КУ по формулам (6) – (7);

6. Выбрать места установки дополнительных КУ с учетом частных производных $\frac{\partial П}{\partial Q_i}$ и загрузки сети.

Выводы.

Наиболее трудоемкие вычислительные операции (п.1–3), необходимые для реализации алгоритма, являются составной частью расчетов нормальных режимов электрической сети, и для решения задачи нужно лишь дополнить их расчетом производных от потерь по мощности дополнительных КУ.

Предлагаемый алгоритм выбора мест установки дополнительных КУ эффективен в сочетании с программой расчета установившегося режима методом Ньютона, при решении линеаризованных уравнений на шаге расчета блочным методом двойной факторизации [4], что подтверждается расчетами по выбору средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Список литературы: 1. *Потребич А.А.* Эффективность выбора мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях энергосистем / *А.А. Потребич* // Электрические станции. – 2001. – № 5. – С. 34. **2.** *Железко Ю.С.* Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в электрических сетях / *Ю.С.Железко, А.Р. Артемьев, О.В. Савченко.* – Москва, Изд. НЦ ЭНАС. – 2002. **3.** *Самарский А.А.*Численные методы / *А.А. Самарский, А.В. Гулин*. – М.; Наука, 1989. – 432 с. **4.** *Веприк Ю.Н.* Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке/ *Ю. Н. Веприк* // Электротехника и электромеханика. — 2010. — № 3. — С. 59-61.

Поступила в редколлегию 05.10.2011

УДК 621.315.62

Ю.Г. ГОНТАРЬ, аспірант, НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРОЗОВОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА

В статті розглянуті питання виникнення пробою по поверхні твердого діелектрика, електричні схеми заміщення ізоляційних конструкцій та наведені основні закономірності для напруги та напруженості поля при поверхневому розряді. Було показано, що розподіл поля визначається в основному ємнісними процесами.

В статье рассмотрены вопросы возникновения пробоя на поверхности твердого диэлектрика, электрические схемы замещения изоляционных конструкций и приведены основные закономерности для напряжения и напряженности поля при поверхностном разряде. Было показано, что распределение поля определяется в основном емкостными процесами.

The questions of a breakdown on the surface of a solid dielectric, the electrical equivalent circuit of insulating structures and the basic laws for the stress and field intensity at the surface discharge. It was shown that the field distribution is mainly determined by capacitive processes.

Введение. В условиях испытаний и эксплуатации изоляции трансформаторов, электрических машин, кабелей и конденсаторов часто наблюдается явление электрического разряда вдоль поверхности изоляционного материала.

Цель, задачи исследования. Основная задача при рассмотрении поверхностных разрядов заключается в установлении зависимости разрядного напряжения от параметров, определяющих распределение поля. Важнейшими из них являются: геометрические размеры и форма изоляционной конструкции; расположение токоведущих частей; электрические характеристики диэлектрика и окружающей его среды; система напряжения. При перенапряжениях и при испытаниях изоляции выпрямленным напряжением на поверхности диэлектрика происходит образование объемного заряда.

В данной статье рассматриваются факторы, от которых зависит величина напряжения поверхностного пробоя (в частности его объемные и поверхностные свойства) при помощи электрических схем замещения электроизоляционных конструкций.

Физический механизм процесса поверхностного разряда. При поверхностном разряде возникают электроны, которые быстро уходят из сферы разряда благодаря их малой массе и значительной скорости. Приповерхностный слой диэлектрика содержит ряд дефектов (ловушек), на которых могут задерживаться электроны. Ловушками зарядов

являются границы аморфной и кристаллической фазы, антиоксиданты и примеси, продукты химической сшивки полимеров, полярные группы, которые образовались вследствие окисления полимеров. Они есть по всей толщине диэлектрика, но в поверхностном слое их наибольшее количество. При напряженностях поля от 2 до 20 МВ/м (в зависимости от диэлектрика), электроны переходят из металла в приповерхностный слой диэлектрика и задерживаясь там в ловушках, образуют объемный заряд. Когда напряженность поля начинает уменьшаться (после перехода через максимум), происходит инжекция дырок в приповерхностный слой. Этому способствует уже собственное поле объемного заряда.

Дальнейшее перемещение заряда в глубину диэлектрика происходит при значительно высоких напряженностях поля, т.к. концентрация поверхностных дефектов уменьшается с глубиной.

Инжекция зарядов в диэлектрик происходит, когда напряженность поля превышает некоторое критическое значение: $E > E_{кр}$. Так, для полиэтилена $E_{кр}$ = 10–20 МВ/м, что достаточно близко к типовым рабочим напряженностям поля $E_р$ и является величиной одного порядка с испытательными напряженностями. Таким образом, образование объемного заряда происходит как при перенапряжениях на изоляции, так и при обычных ее испытаниях выпрямленным напряжением.

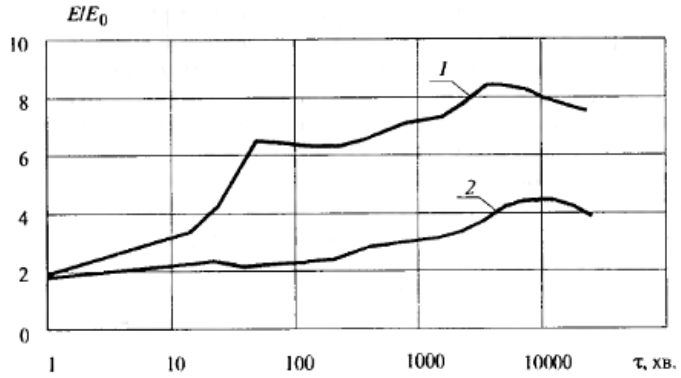


Рис. 1 – Кинетика накопления объемного заряда в образце кабельной изоляции на протяжении нескольких сотен часов (1 – возле внутреннего электрода; 2 – возле внешнего электрода; E/E_0 – кратность перенапряжения вследствие накопления объемного заряда)

Уже через 1 минуту с момента подачи напряжения уровень внутреннего поля в два раза превысил номинальный. В конце интервала наблюдения имеется 4×8-разовое увеличение напряженности.

Электрические разряды на поверхности твердых диэлектриков. На начальных этапах своего развития поверхностный разряд представляет собой совокупность микроразрядов, которые возникают у края тонкого электрода, расположенного на поверхности диэлектрической пластины (барьера), и в каждый полупериод воздействующего переменного напряжения имеют форму отдельных каналов, длина и число которых зависят от конфигурации электродов и от значения приложенного напряжения. Теорию разрядов можно рассматривать с помощью электрических схем замещения изоляционных конструкций. В процессе изучения явления, по мере раскрытия его механизма, схема замещения может уточняться или заменяться.

Для проведения эксперимента использовался проходной изолятор П 10 (рис. 3), который подвергался воздействию грозового перенапряжения (рис. 2).

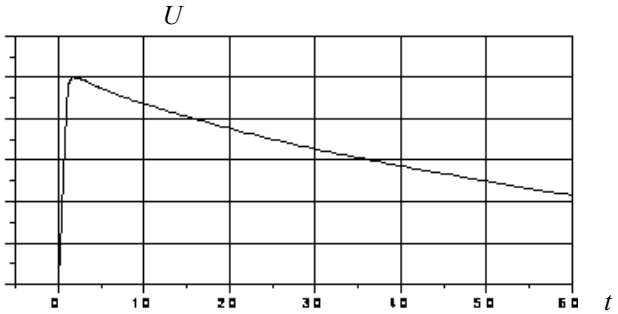


Рис. 2 – Форма грозового импульса

Была составлена расчетная модель (рис. 3 *б*) и рассчитана схема экспериментальной установки с помощью правил Кирхгофа:

$$-\frac{\partial i_s}{\partial x} = \sigma_v (u_0 - u_s) + C_v \frac{\partial (u_0 - u_s)}{\partial t},$$
$$\frac{\partial u_s}{\partial x} = i_s Z_{s,} \qquad (1)$$

где i_s – ток вдоль поверхности изоляции; u_o – напряжение на стержне T относительно заземленного электрода F; u_s – напряжение на поверхности изоляции на расстоянии x от электрода F; σ_v – объемная проводимость единицы длины изоляции при постоянном токе; C_S – поверхностная емкость и C_V – объемная емкость.

После ряда преобразований напряженность поля вдоль поверхности изоляции будет выражена

$$\dot{E}_s = -\frac{d\dot{U}_s}{dx} = -\gamma \dot{U}_0 \frac{ch\gamma(l-x)}{sh\gamma l}, \qquad (2)$$

а у края электрода, при $x = 0$,

$$\dot{E}_0 = -\dot{U}_0 \gamma \cdot \mathrm{cth}\gamma l, \qquad (3)$$

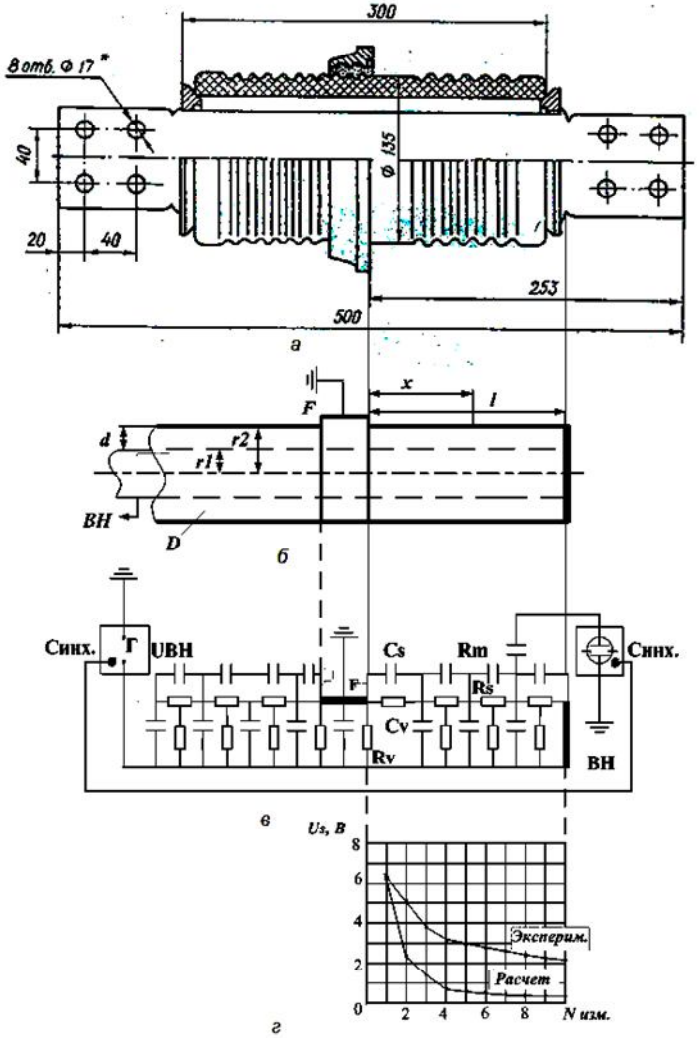


Рис. 3 – Расчетная и экспериментальная схема для определения распределения напряжения по поверхности изолятора П10

Таким образом, для напряжения на электроде *F* получается

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_0}{\gamma} th\gamma l. \qquad (4)$$

При этом вектор напряженности поля направлен в сторону убывающего потенциала.

В высоковольтных электроизоляционных конструкциях, работающих на переменном токе, распределение поля определяется в основном емкостными процессами, поэтому напряжение и среднее значение напряженности поля при поверхностном пробое (перекрытии) будут записаны в виде:

$$U_n = E_n \sqrt{\frac{k\varepsilon_m d_э}{\varepsilon_v}} th \sqrt{\frac{\varepsilon_v l^2}{k\varepsilon_m d_э}}, \qquad (5)$$

$$E_{n\ ср} = E_n \frac{th\sqrt{\dfrac{\varepsilon_v l^2}{k\varepsilon_m d_э}}}{\sqrt{\dfrac{\varepsilon_v l^2}{k\varepsilon_m d_э}}}. \qquad (6)$$

где ε_v – диэлектрическая проницаемость изоляции; ε_m – диэлектрическая проницаемость окружающей среды.

Формулы (5) и (6) выражают закономерности в области электрических разрядов на поверхности твердых диэлектриков и электроизоляционных конструкций при переменном токе.

Расчетная и экспериментально полученная зависимость распределения напряжения по поверхности твердого диэлектрика при переменном токе при нормальных условиях представлена на рис.3 *г*.

Использование данных схем замещения позволяет подробно рассматривать теорию электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков. Однако в модели, предложенной Мантровым, не учитываются примеси и структура диэлектрика, различные неоднородности в виде воздушных включений, прослоек между отдельными слоями, микротрещин, отслоения изоляции и др. Кроме этого, увлажнение слоя загрязнения на изоляторах моросящим дождем или росой приводит к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, изменению распределения напряжения по поверхности и в результате – к снижению его разрядного напряжения наружной изоляции электроизоляционных конструкций за счет перераспределения напряжений по поверхности изоляторов, что облегчает развитие поверхностного разряда.

Выводы:

1. На поверхности твердых диэлектриков могут возникать различные стадии разряда, причем для определения величины разрядного напряжения необходимо знать характер распределения электрического поля на поверхности изоляции.

2. Распределение поля в высоковольтных электроизоляционных конструкциях, работающих на переменном токе, определяется в основном емкостными процессами; зависит не только от диэлектрической проницаемости изоляции, но и от проницаемости окружающей среды.

3. Схемы замещения, а также полученные при помощи их уравнения позволяют описать процесс электрического разряда по поверхности диэлектрика. Они обладают самыми общими принципами обсуждаемого явления, не углубляясь при этом в его физический механизм. Модель Мантрова не учитывает примеси и структуру диэлектрика, различные неоднородности в виде воздушных включений, прослойки между отдельными слоями, микротрещины, отслоения изоляции и влияние различных атмосферных факторов, что облегчает развитие поверхностного разряда. Поэтому, в процессе изучения явления, по мере раскрытия его механизма, изображающая его схема замещения должна уточняться или заменяться.

Список литературы: **1.** Техніка і електрофізика високих напруг / *В.О. Бржезицький, В.М. Михайлов, А.В. Ісаков, В.В. Рудаков, А.Г. Гурин, Б.Г. Набока.*. – Х.:НТУ "ХПІ", ТОВ "Торнадо", К.:НТУУ "КПІ". – 2004 р. **2.** *Мантров М.И.* Расчет разрядных напряжений высоковольтных изоляторов / *М. И. Мантров.* – М.:МЭИ. – 1966 г. **3.** *Григорьев А. Н.* Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика // Известия Томского политехнического университета / *А.Н. Григорьев, А.В. Павленко, А.П. Ильин, Е.И. Карнаухов.* – 2006. – Т.309 – №1. **4.** *Кучинский Г.С.* Техника высоких напряжений / *Г. С. Кучинский, И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова.* – СПб. : Энергоатомиздат. – 2003.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

УДК 621.315.2

А.Г. ГУРИН**,** д-р. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»;
О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук, проф.,НТУ «ХПІ»

МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИСИХАННЯ ОТОЧУЮЧОГО ГРУНТУ НА ДОПУСТИМИЙ СТРУМ НАВАНТАЖЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЮ

Проаналізовано вплив висихання грунту на пропускну спроможність кабелів на напругу 220 кВ.

Выполнен анализ влияния высыхания грунта на допустимій ток кабелей напряжением 220 кВ.

The analysis of datas of calculation of the current rating of cables at direct voltages up to 220 kV.

Постановка проблеми. Високовольтні кабелі із зшитою поліетиленовою ізоляцією є інноваційною продукцією кабельної промисловості України. При прокладанні силового кабелю в ґрунті останній довкола кабелю висихає і його питомий тепловий опір збільшується. Стандарт МЕК (IEC 287-1-1) рекомендує враховувати висихання ґрунту при визначенні допустимого струму, однак не містить конкретних рекомендацій щодо методу виконання відповідних розрахунків. Для використання інноваційних конструкцій кабелів у мережах електропостачання є вкрай необхідним визначення впливу умов прокладання на пропускну спроможності таких кабелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стандарт МЕК (IEC 287-1-1) [1] рекомендує для врахування висихання ґрунту при визначенні допустимого струму силових кабелів використовувати уявлення про дві зони в ґрунті, коли зона безпосередньо прилегла до кабелю є сухою, тоді як друга зона зберігає питомий тепловий опір нормального ґрунту (відносно вологого). Границя між зонами є ізотермою. Відповідно для тривало допустимого струму без врахування діелектричних втрат за максимально допустимої температури θ_1:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_1 - \theta_2 + (\nu - 1)\cdot \Delta\theta_x}{n \cdot R_{ж}\left[S_1 + (1+k_1)(S_2 + S_3 + \nu S_4\right]}} \quad , \qquad (1)$$

де ν — відношення теплових опорів сухої та вологої зон грунту ($\nu = \sigma_c / \sigma_w$),

$R_{ж}$ — опір жили змінному струму за температури θ_1

σ_c — тепловий опір сухого ґрунту (К·м/Вт);

σ_w — тепловий опір вологого ґрунту (К·м/Вт);

θ_x — температура границі між сухою та вологою зонами довкола кабелю (°С);

θ_1 — температура жили (°С);

θ_2 — температура оточуючого середовища (°С);

$\Delta\theta_x$ — різниця температури на границі сухої і вологої зон та температури ґрунту $(\theta_x - \theta_2)$, (К);

k_1 — коефіцієнт втрат в металевих захисних елементах кабелю, якщо такі є;

θ_x і σ_w — мають бути визначені для конкретних умов прокладання [1].

Розрахунки за співвідношенням (1) можуть бути виконані, якщо є відомості про σ_c та σ_w і про ширину d сухої зони довкола кабелю, причому, по-перше, σ_c, σ_w, d, I, θ_x є взаємопов'язаними величинами, по-друге, доступними є лише відомості про діапазони можливих значень теплового опору ґрунту σ_c, σ_w, а значить в (1) три невідомих: d, I, θ_x, визначення яких за одним рівнянням неможливе, а інший спосіб в [1] не визначений.

В [2] для визначення тривало допустимого струму нами запропоновано модель з двох рівняннь, — першого на основі (1) та другого для різниці температури θ_x ізотерми на границі сухої зони і температури θ_2 оточуючого середовища за відомою [3] формулою для теплового опору ґрунту:

$$\theta_x - \theta_2 = R_{ж} \cdot I^2 \cdot \frac{\sigma w}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r_k + d}\right), \qquad (2)$$

де r_k – половина зовнішнього діаметра кабелю;

L – глибина прокладання;

d – ширина сухої зони щодо якої необхідне припущення.

Спільне вирішення рівнянь (1) і (2) для діапазону можливих значень теплових опорів ґрунту σ_c і σ_w дає змогу оцінити дві з трьох невідомих, якщо відношення теплових опорів сухої та вологої зон ґрунту $\nu = \sigma_c / \sigma_w$ обране незалежною змінною. Приклад вирішення такої системи за умови вибору ширини сухої зони $d = \nu \cdot r_k$, , що відображує збільшення ширини сухої зони при збільшенні питомого теплового опору сухого ґрунту для кабелю ААШв 3х25-10 наведено в [2]. Він свідчить, що по-перше, поправка на допустимий струм для цього кабелю за висихання ґрунту становить (11—14) %, отже є суттєвою, а по-друге, температура умовної ізотерми θ_x зменшується. Вирішення даної задачі для більш потужніх

кабелів, призначених для прокладання в землі, є необхідним, оскільки в таких кабелях виділяється більша кількість теплової енергії.

Високовольтні кабелі із зшитою поліетиленовою ізоляцією мають цілий ряд відмінностей, принципових для вирішення саме цієї задачі. Головними є такі:

1) суттєво вища гранично допустима температура ізоляції із зшитого поліетилену (90 ^{O}С);

2) тільки одножильна конструкція з великою площею перерізу струмопровідної жили, що зумовлює нагрівання (отже, - висихання ґрунту) на значній відстані навколо кабелю;

3) суттєві втрати в захисних металевих елементах конструкції кабелю, які є незначними у трьохжильних кабелів змінного струму в спільних металевих захисних елементах конструкції;

4) залежність питомих теплових параметрів поліетилену від температури, що не дозволяє величини теплового опору ізоляції і втрат в ізоляції вважати параметрами системи і потребує введення в (1), щонайменше, наближеної апроксимації функцій $S_1 = f(\theta)$, $tg\delta = f(\theta)$, де середня температура ізоляції кабелю є змінною для даної системи рівнянь;

5) спеціальні конструкції струмопровідних жил для зменшення впливу вихрових струмів на втрати в жилах, що не дозволяє величину $R_{æ}$ в (1) і (2) вважати параметром системи і потребує введення в (1) і (2), щонайменше, наближеної апроксимації функції $R_{ж} = f(\theta)$ з урахуванням втрат на вихрові струми;

6) вплив на висихання ґрунту сусідніх кабелів, оскільки кабельна лінія завжди прокладається кількома одножильними кабелями.

Модель для визначення допустимого струму навантаження високовольтного кабелю з урахуванням зазначених особливостей в доступних джерелах відсутня.

Ціль роботи. Створити на основі співвідношень (1) і (2) розрахункову модель у вигляді системи рівнянь для визначення впливу висихання оточуючого ґрунту на допустимий струм навантаження високовольтного кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією. Кількісно оцінити в поправку на допустимий струм для кабелю на 220 кВ за висихання ґрунту навколо кабелю.

Одержані результати. На рисунку 1 наведена схема, використана при побудові моделі. Три одножильні кабелі прокладені в ґрунті на глибині L, в одній площині, на відстані h один від одного. При такому прокладанні найбільші втрати в металевих захисних елементах (екран, немагнітна броня і т.ін.) найбільші у крайніх кабелів, оскільки максимальними є коефіцієнти взаємоіндукції крайніх кабелів, наприклад,

для металевого екрану по ізоляції крайнього кабелю цей коефіцієнт дорівнює:

$$M_{1-3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h \cdot 2}{r_c + \frac{\Delta_e}{2}}, \qquad (3)$$

де r_e, Δ_e – відповідно середній радіус екрану і товщина екрану.

Для кабелю з найбільшими втратами в металевих захисних елементах тепловідведення з поверхні кабелю в оточуюче середовище відбувається в межах кута $\beta < 2\pi$. Для визначення кута β залежно від відстані між кабелями, глибиною прокладання і питомим тепловим опором грунту використана формула [4] для розрахунку теплового опору між n однаковими циліндрами необмеженої довжини, розташованими на глибині L паралельно ізотермічній поверхні твердого півпростору, якщо відстань між циліндрами однакова і дорівнює h:

$$S = \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4 \cdot L}{d_k} + (n-1) \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{h} - 2.3 \cdot n \cdot B_n \right], \qquad (4)$$

розрахунки за якою дають можливість оцінити співвідношення теплових опорів одного чи кількох кабелів, розташованих в площині (рис.1). Ці розрахунки дозволили визначити діапазон значень кута β залежно від відстані між кабелями в межах $h \in |d_k; ...; 2d_k|$. Відповідно: $\beta \in |\pi; ...; 4\pi/3|$.

До формул (1), (2) і (3) у буквеному вигляді входить ряд параметрів, які можуть бути віднесені до трьох груп: конструктивні параметри кабелю (наприклад, термічний опір ізоляційного матеріалу), для яких представлені величини є базовими для аналізу пропускної спроможності саме цього кабелю; параметри, що відображають умови оточуючого середовища і які можуть суттєво відрізнятися для регіонів, в яких застосовують чи можуть застосовувати даний кабель; параметри, які є результатом узгодження між виробником і користувачем щодо застосування обмежень для забезпечення безпечної роботи (наприклад, максимальна температура жили).

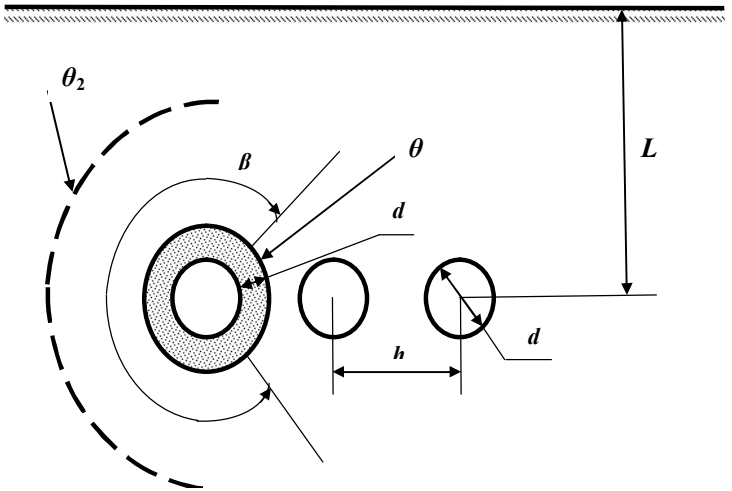


Рис.1 – Схема, для побудови моделі: три одножильні кабелі прокладені в грунті на глибині *L*, в одній площині, на відстані h один від одного; зона сухого грунту завширшки d навколо крайнього кабелю затінена

Результати визначення допустимого струму кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ за одночасного застосування співвідношень (1), (2) і (3) як системи рівнянь, та за припущень, які ілюструє рис.1, представлені на рис. 2, у вигляді залежностей тривало допустимого струму I (а) і температури уявної ізотерми θ_x (б) між сухою і вологою зонами грунту від питомого теплового опору грунту.

Таблиця – Максимальні і мінімальні допустимі температури довкілля [1]

Клімат	Температура оточуючого повітря на рівні моря		Температура землі на глибині 1 м	
	Мінімальна °С	Максимальна °С	Мінімальна °С	Максимальна °С
Тропічний	25	55	25	40
Субтропічний	10	40	15	30
Помірний	0	25	10	20

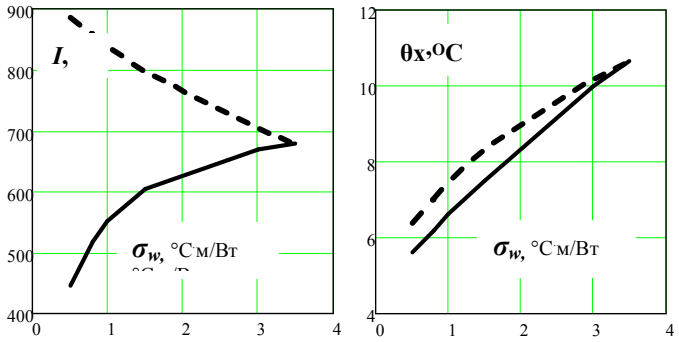


Рис. 2 – Тривало допустимий струм (а) і температура уявної ізотерми (б) між сухим і вологим грунтом залежно від питомого теплового опору грунту:суцільні - за висихання грунту; штрихові - без висихання грунту

Вибрані параметри моделі:температура жили 90 °С, температура грунту 15 °С, питомий тепловий опір ізоляції 3,7 К·м/Вт, глибина прокладання 1500 мм, питомий тепловий опір сухого грунту 3,5 К·м/Вт, ширина сухої зони $d = \nu \cdot d_k/2$, де ν — відношення теплових опорів сухої та вологої зон ($\nu = \sigma_c / \sigma_w$); площа поперечного перерізу мідної струмопровідної жили 1200 мм^2, відстань між кабелями дорівнює їх діаметру.

Тут наведені основні параметри розрахунку. Очевидно, що конкретні значення допустимого струму залежать від багатьох інших параметрів, наприклад, **конструктивних**: товщина: ізоляції, напівпровідних екранів, електропровідного екрану, захисних елементів конструкції кабелю; параметри конструкції жили: коефіцієнт скрутки, сегментальність;

теплових:температура мідного екрану, діапазон значень питомого теплового опору вологого грунту, питомий тепловий опір захисних покривів; допустима температура довкілля (див. табл.);

технологічних:коефіцієнт заповнення перерізу жили, коефіцієнт нагартовки, технологічна витяжка,

електричних:напруга, діелектрична проникність ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат ізоляції і його залежність від температури.

Але загальний вигляд залежностей на рис.2 є типовим і свідчить про значний вплив підсихання грунту в стаціонарному режимі номінального навантаження кабелю.

Висновки.

1. Для грунтів з малим питомим тепловим опором (від 0,5 °С·м/Вт до 1 °С·м/Вт) врахування висихання ґрунту при визначенні допустимого струму силових кабелів обов'язкове, оскільки допустимий струм відрізняється практично вдвічі; при прокладанні потужних кабелів у

землі часто використовують спеціальні засипки з малим питомим тепловим опором, для визначення пропускної спроможності кабельної лінії необхідна додаткова інформація про залежність цієї величини від вологості та температури.

2. В сухих грунтах з великим питомим тепловим опором (3 °С·м/Вт і вище) висихання ґрунту при визначенні допустимого струму кабелів не суттєве.

3. Для грунтів з нормальним питомим тепловим опором (більше 1 °С·м/Вт і менше 3 С·м/Вт) врахування висихання ґрунту при визначенні допустимого струму силових кабелів обов'язкове і може бути виконане за допомогою запропонованої моделі без додаткової інформації про властивості грунту у вигляді рекомендованих інтервалів для пропускної спроможності кабелю.

Список літератури: **1.** ДСТУ IEC 60287 – 1, 2, 3. Електричні кабелі . Розрахунок номінального струму. **2.** *Карпушенко В.П.*Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / *В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонець, О.А. Науменко.* – Х. : Регіон-інформ, 2000. – 376 с.

Поступила в редколлегию 30.09.2010

УДК 621.315.2; 531.62

А.Г. ГУРИН, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
В.А. КУТОВОЙ, канд. физ.–мат. наук, ст. науч. сотр., ННЦ«ХФТИ»;
Ю.А. АНТОНЕЦ, канд. техн. наук, ЗАО « Южкабель», Харьков;
В.П. КАРПУШЕНКО, канд. экон. наук, ЗАО « Южкабель», Харьков
Е.С. МОСКВИТИН, аспирант, НТУ «ХПИ»

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ И ПРОПИТКИ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Разработана вакуумная установка с автоматической системой управления, позволяющая ускорить процесс сушки кабеля в бумажной изоляции, улучшить условия работы обслуживающего персонала, снизить энергопотребление.

Розроблена вакуумна установка з автоматичною системою управління, яка дозволяє прискорити процес сушіння кабелю в паперовій ізоляції, поліпшити умови праці обслуговуючого персоналу, зменшити енергоспоживання.

An automatic control vacuum drier has been developed that provides for acceleration of the process of drying cable, paper-insulated cable, improves working conditions of personnel, decrease energy consumption.

Постановка проблемы. Кабельные изделия в бумажной изоляции применяются во многих хозяйствах: энергетике, добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности, строительстве, на транспорте, в сельском хозяйстве, быту и других отраслях производства. Производство силовых кабелей развивалось и продолжает развиваться с развитием систем электроснабжения. Поэтому, для увеличения производства силовых кабелей с бумажной изоляцией необходимо учитывать накопленный опыт, сложившуюся структуру производства, качество выпускаемой продукции, энергопотребление, экологию.

Производство кабеля в бумажной изоляции представляет собой сложный производственный процесс, в котором применяются различные материалы и множество технологических операций. Одной из таких технологических операций при производстве кабеля в бумажной изоляции является сушка бумажной изоляции. Этот технологический процесс связан с нагревом кабеля в закрытых вакуумных объемах. Скорость сушки зависит от температуры нагревания, количества влаги в бумажной изоляции, давления в окружающей среде, длительности нагревания электрического кабеля по времени. [1]. Все эти параметры оказывают влияние на скорость сушки кабельных изделий, а также на его эксплуатационные характеристики.

В связи с высокой термочувствительностью электрической изоляции материалов, при разработке технологии сушки изоляции

высоковольтного оборудования возникает вопрос о величине допустимой температуры и допустимой длительности ее воздействия на изоляцию на различных стадиях этого процесса. Эта проблема становится особенно актуальной в последние годы, поскольку основным направлением повышения эффективности и экономичности высоковольтной изоляции является интенсификация процессов тепломассопереноса за счет использования более жестких режимов и изыскания методов, основанных на применении повышенных температур и больших тепловых потоков.

Анализ последних исследований и публикаций. По мнению многих авторов [1÷8] оптимальным для процесса сушки является диапазон температур 120÷135°С. При этом нагревостойкость бумажного диэлектрика оценивалась по изменению $tg\delta$, электрической прочности и механических свойств (прочности на разрыв и числа двойных перегибов), относительной степенью полимеризации кабельной бумаги [8]. В ряде работ отмечается влияние продолжительности термовакуумной обработки на степень старения изоляции, когда при прочих равных условиях ухудшались свойства материалов, уменьшалась относительная степень полимеризации кабельной бумаги. Например, увеличение длительности образцов бумажной изоляции с радиальной толщиной $h = 10$ мм при t =130°С и $P = 1 \cdot 10^{-1}$ мм. рт. ст. за время от 9,3 до 17,9 ч приводило к уменьшению степени относительной поляризации от 0,98 до 0,859. Отрицательное действие длительно воздействующего нагрева особенно влияет на разрушение верхних слоев изоляции, где степень относительной поляризации может снижаться до 0,8-0,85. Согласно данным [9], существенного различия по влиянию величины остаточного давления в котле на глубину старения средних и внутренних слоев материала по сравнению с поверхностными слоями замечено не было.

С целью выполнения перечисленных требований к технологическому процессу сушки бумажно-масляной изоляции была проведена модернизация вакуумно-сушильного комплекса на заводе "Южкабель".

Вакуумная сушильная установка. Эксплуатация устаревшего оборудования и энергоемкая технология ухудшила техническое состояние участка по производству силовых кабелей с бумажной изоляцией. Это сказывалось при решении вопроса по увеличению мощности производства силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. Поэтому необходимо было провести техническое перевооружение участка сушки-пропитки на более современное, менее энергоемкое оборудование, позволяющее сократить технологический процесс сушки-пропитки, повысить уровень автоматизации технологического процесса, улучшить качество выпускаемой продукции.

Устаревшая схема вакуумной сушки силовых кабелей с бумажной изоляцией, представлена на рис. 1Данная схема имеет недостаток,

заключающийся в том, что нижняя часть вакуумного трубопровода 2 (диметром 110мм) соединяющего форвакуумный насос 3 с котлом 1 расположена на отметке ниже уровня насоса. При такой схеме расположения трубопровода водяные пары, попадая в трубопровод 2, конденсируются в нем, так как длина вакуумного трубопровода большая, а температура его стенок недостаточная для того, чтобы влага находились в нем в

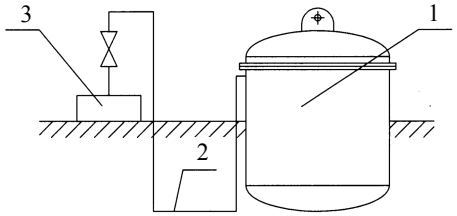


Рис. 1 – Схема вакуумной сушки силовых кабелей с бумажной изоляцией

газообразном состоянии. Сконденсированная влага скапливается в трубопроводе, тем самым значительно уменьшая его сечение, в связи с чем, понижается скорость удаления влаги из котла. Поэтому необходимо было затратить много энергии и времени, чтобы удалить сконденсированную влагу из вакуумного трубопровода. Для решения этой проблемы необходимо заменить конфигурацию вакуумных трубопроводов, а вакуумную сушку кабельных изделий производить с помощью специально разработанной вакуумной установки с применением водокольцевых насосов вместо использовавшихся масляных насосов типа АВЗ.

Вновь разработанная схема подключения котла к вакуумному насосу с помощью вакуумных трубопроводов представлена на рис.2. В предлагаемой схеме следует соединять вакуумный насос 4 с котлом 1 в верхней его части и располагать вакуумный трубопровод над последним. [2].

Вакуумный трубопровод состоит из трубопровода 2, который расположен вертикально и трубопровода 3, расположенного с уклоном в сторону вакуумного водокольцевого насоса 4. При данной схеме подключения пары влаги поднимаются по трубопроводу 2 вверх. На первой стадии вакуумной откачки, когда стенки трубопровода 2 имеют комнатную температуру, пары конденсируются в вакуумном трубопроводе 2 и возвращаются обратно в котел 1.

В котле конденсат превращается в пар и устремляется в трубопровод 2. Этот процесс происходит до тех пор, пока трубопровод 2 не нагреется до температуры, при которой пар не конденсируется. Водяной пар, попадая из трубопровода 2 в трубопровод 3, конденсируется, но так как

участок трубопровода имеет наклон в сторону водокольцевого насоса сконденсированная вода уходит в водокольцевой насос. Наклон трубопровода 3 в сторону водокольцевого насоса предусмотрен для того, чтобы устранить возврат сконденсированной влаги обратно в котел, а конденсат не задерживался в трубопроводе 3 и тем самым не уменьшал его пропускную способность. Данная схема соединения вакуумного трубопровода позволяет значительно сократить время сушки, увеличивает эффективность откачки водяного пара из котла, понижает потребление электроэнергии, улучшает экологию окружающей среды. При этом диаметр используемого трубопровода по данной схеме уменьшился со 110 мм до 50мм.

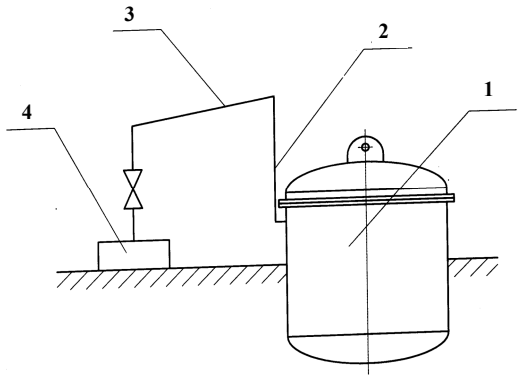


Рис. 2 – Схема подключения котла к вакуумному насосу с использованием вакуумных трубопроводов

При изготовлении электрического кабеля на каждую жилу накладывается изоляция из кабельной бумаги толщиной 120мкм и плотностью 850…1050кг/м^3. Ленты бумаги накладывают внахлест с положительным перекрытием 8..10мм. [3]**.** Для устранения обрывности бумажных лент при наложении на жилу кабеля, последние смачивают водой. Равновесная влажность бумаги при нормальных условиях составляет 6…8% по массе. С целью повышения электроизоляционных свойств кабельной продукции необходимо провести сушку бумажной изоляции при температуре не выше 403К, так как при повышении температуры сушки идет интенсивный процесс расплавления лигнина, который составляет 3,5…4,0% от общей массы. Для того чтобы провести сушку кабеля его укладывают в металлическую корзину. Корзину с кабелем размещают в вакуумном сушильно-пропиточном котле. В каждом котле вмещается две корзины.

Откачка газов и водяного пара из котла осуществляется с помощью вакуумных водокольцевых насосов (рис. 3).

Установка состоит из двух водокольцевых насосов 1, каждый из которых соединен с вакуумным объемом через клапан электрический 2, клапан аварийный 3, теплообменник 4, клапан вакуумный ручной 5. Давление в вакуумной магистрали измеряется вакуумметром 6. О подаче воды на водокольцевые насосы и теплообменник сигнализируют лампы, включаемые струйным реле 7.

На рис 4 приведена блок-схема разработанной вакуумной установки для сушки электрического кабеля с бумажной изоляцией.

Водокольцевой насос типа ВВН-6 предназначен для получения давления в рабочем котле до $9{,}3 \cdot 10^3$ Па (70 мм рт. ст.). Его производительность при 0,02 МПа (150 мм рт. ст.) – 5,0 $м^3$/мин., потребляемая мощность электродвигателя – 11кВт. Второй водокольцевой насос ВВН-3Э с эжектором создает предельное остаточное давление в откачиваемом объеме до 931Па (7мм рт. ст.). Его производительность при давлении $2{,}66 \cdot 10^3$ Па (20 мм рт. ст) - 1,8 $м^3$/мин., потребляемая мощность – 5,5 кВт.

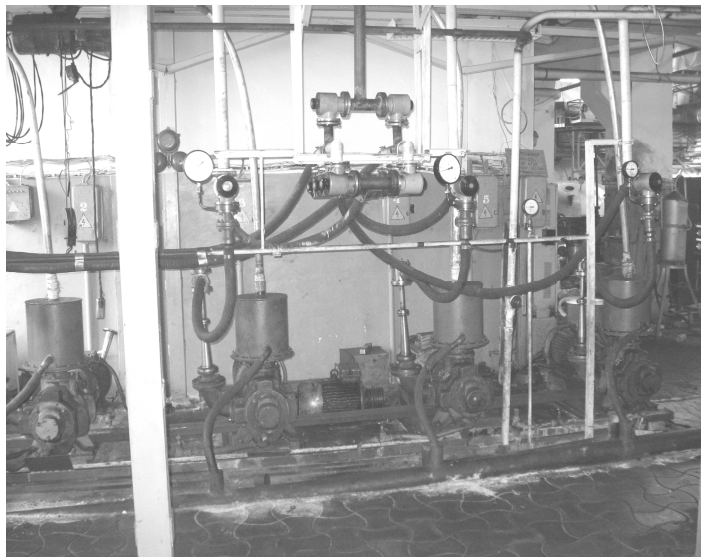


Рис. 3 – Вакуумное оборудование сушильно-пропиточного участка

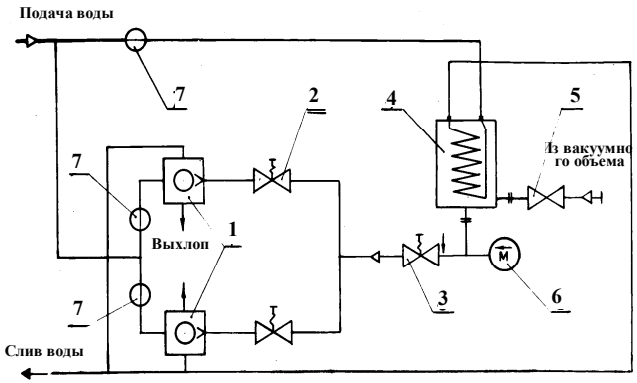


Рис. 4 – Блок-схема вакуумной установки для сушки-пропитки электрического кабеля с бумажной изоляцией

Электрический клапан 2, соединяющий водокольцевой насос с вакуумной магистралью, может быть открыт при работающем вакуумном насосе и необходимом количестве подаваемой в него воды.

Клапан аварийный 3 служит для автоматического отсоединения вакуумного насоса от откачиваемого объема при исчезновении напряжения в сети. При этом исключается попадание воды из вакуумного насоса в откачиваемый объем.

Теплообменник 4, установленный в верхней части установки, служит для конденсации водяного пара, откачиваемого из котла, и уменьшает количество тепловой энергии выделяемой в котле при передаче ее вакуумному водокольцевому насосу. Ручной клапан 5 соединяет вакуумный насос через вакуумный трубопровод с рабочим объемом.

Включение установки, наблюдение и управление за режимом работы установки осуществляется с пульта управления.

Процесс сушки кабеля в бумажной изоляции состоит из двух этапов. Первый этап сушки реально начинается с прогрева кабеля в вакуумном сушильно-пропиточном котле при атмосферном давлении. Это ускоряет нагревание кабеля до заданной температуры. После нагревания кабеля до заданной температуры при атмосферном давлении котел герметизируют, и производится откачка газов и пара из котла. Во время сушки кабель в бумажной изоляции нагревают до температуры 393К. Водяной пар с высокой температурой из котла устремляется в вакуумный насос. Для того, чтобы корпус вакуумного водокольцевого насоса не нагревался выше температуры указанной в его эксплуатационных характеристиках

между котлом и насосом необходимо устанавливать теплообменник. Применение теплообменника способствует понижению давления в котле и облегчает работу вакуумного насоса. В качестве охлаждающего агента в теплообменнике можно использовать воду. Тепловой расчет теплообменника сводится к определению его поверхности, которая отбирает на себя часть тепловой энергии парогазовой смеси, поступающей из вакуумного объема, во время сушки кабельных изделий, в вакуумный водокольцевой насос. Правильно подобранный теплообменник предотвращает нагревание водокольцевого насоса до температуры, при которой начинают ухудшаться его эксплуатационные характеристики.

В начальной стадии сушки водяные пары из котла откачивались с помощью вакуумного водокольцевого насоса ВВН-6, так как в это время сушки из бумажной изоляции выделяется большое количество пара (сотни $м^3$). После того, как в котле было достигнуто давление 9,3кПа, насос ВВН-6 отключался и включался насос ВВН-3Э с эжектором, потребляемая мощность которого ниже в два раза, чем у вакуумного насоса типа ВВН-6. Это позволило сократить расход электроэнергии, удалить остаточную влагу из котла и понизить давление в котле до 931Па.

Таблица 1 – Результаты сушки кабеля на напряжение 10 кВ на вновь разработанной установке

Время работы установки, час, мин.	Давление в котле, кПа	Температура кабеля, К	Температура вакуум-провода на выходе из котла, К	Температура воды в вакуумном насосе, К
Включен насос ВВН6				
-	100,5	293	297	291
0,30	16,2	325	309	292
1,0	17,3	345	318	293
1,30	21,3	357	341	297
2,0	20,2	361	343	301
2,30	20,2	378	350	301
3,0	17,3	393	355	301
3,30	9,3	394	353	301
Включен насос ВВН3-Э				
4,0	0,93	401	341	296
4,30	0,93	403	327	293
5,0	0,93	403	327	292

Таблица 2 – Сушка кабеля в бумажной изоляции на вновь созданной установке

Сечение кабеля, мм	Длина, км	Длительность режима под вакуумом при остаточном давлении в котле не более 7,2 мм рт. ст.				Сокращение длительности цикла, час
		Время сушки, час (новая установка)		Время сушки, час (старая установка)		
		Сушка	Пропитка	Сушка	Пропитка	
3×50	5,0	3,5	4.0	9	4	5,5
3×70	4,0	4.0	4.0	12	4	8.0
3×120	3,0	4.0	4.0	12	4	8,0

Из результатов, приведенных в таблице 1 видно, что основной процесс сушки кабеля был осуществлен за 4 часа. Об этом свидетельствует давление 931Па (7,0 мм рт.ст.) в рабочем котле и начало понижения температуры трубопроводов, теплообменника, насоса и повышения температуры кабеля. После проведения сушки бумажную изоляцию пропитывают специальным пропиточным составом. Эта операция призвана обеспечить пропитку бумажной изоляции и заполнение пустот пропиточным составом. Электрическое сопротивление изоляции должно быть не менее 100Мом на 1 км длины кабеля напряжением на 1кВ. и не менее 200Мом на 1 км кабеля напряжением 6, 10кВ. Тангенс угла диэлектрических потерь для кабеля на 10кВ должно быть не больше $tg\delta \le 0{,}008$, [4]

Длительность сушки и пропитки кабеля с помощью новой вакуумной установки сокращена на 5,5…8 часов, таблица 2.

Пропитанный по новой технологии кабель выдержал электрические испытания. Изоляция соответствует требованиям, предъявляемым к изготовляемой кабельной продукции.

Применение фазовых регуляторов типа РОТ для нагревания электрического кабеля в условиях промышленного производства. Сушка силовых кабелей с бумажной изоляцией требует большого потребления тепловой энергии. В качестве источника тепла для нагревания кабеля дополнительно используют водяной пар, который проходит по тепловой рубашке рабочего котла, а в целях интенсификации процесса сушки применяется основное нагревание кабеля электрическим током, проходящим по его жилам плотностью 2,5 $А/мм^2$ для медных жил и - 2,0 $А/мм^2$ для алюминиевых.

Применение переменного тока считается нецелесообразным для нагревания кабеля в связи с увеличением потребляемой мощности за счет реактивной составляющей, так как кабель в корзине представляет собой значительное индуктивное сопротивление, что приводит к дополнительным потерям мощности на вихревые токи и гистерезис. В связи с этим для нагревания кабеля использовался постоянный ток, который вырабатывался мотор-генератором. КПД мотор-генератора 50%., размер (1,5х0,7х1,0)м, вес 860кг, максимальный ток, который мог дать данный генератор 500А. Используя данный мотор-генератор, можно было производить кабельную продукцию с максимальным сечением жилы до 240мм^2. Для увеличения плотности тока в жилах кабеля с большим сечением необходимо было увеличить мощность генераторов, а для их размещения нужны дополнительные производственные площади. Применение генераторов постоянного тока приводит к трудности поддержания постоянной плотности тока в жилах кабеля в процессе нагревания, а наличие сильного постоянного магнитного поля (выше 40кЭ) в пространстве около котла, отрицательно сказывалось на здоровье обслуживающего персонала, так как кабель в корзине представляет собой соленоид с большим количеством витков. Напряженность магнитного поля, в соленоиде с сердечником определяется из выражения

$$H = \frac{k\mu N^2 SI}{l\cos\alpha}, \qquad (1)$$

где H –напряженность магнитного поля, Э; k - коэффициент, зависящий от отношения $\frac{l}{d}$; d - диаметр соленоида, м; μ - относительная магнитная проницаемость; N - количество витков соленоида; S - площадь поперечного сечения соленоида, м^2; I – ток, протекающий по жилам кабеля, А; l - длина соленоида, м; $\cos\alpha$ - косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к поверхности контура;

Для $\frac{l}{d} \geq 10$ коэффициент k равен 1.

Из выражения 1 следует, что при $I \rightarrow 0$, напряженность магнитного поля H будет стремиться к нулю. Поэтому, если скомпенсировать все токи, протекающие во время сушки по жилам кабеля, то удастся снизить напряженность магнитного поля до нуля, не нарушив технологический процесс, и поставленная задача будет выполнена. Это позволит исключить пагубное воздействие магнитного поля на организм обслуживающего персонала.

В последнее время в кабельной промышленности получил широкое распространение прогрессивный метод нагревания жил кабелей при

помощи тиристорных преобразователей. Это позволило повысить качество выпускаемой продукции, увеличить пропускную способность участка сушки-пропитки, повысить оперативность управления и культуру производства, улучшить условия труда обслуживаемому персоналу.

Для нагревания кабельных изделий с бумажной изоляцией на базе регулятора однофазного тиристорного (РОТ) была спроектирована и внедрена новая тиристорная установка с максимальным током 1800А., что позволило изготавливать кабель в бумажной изоляции с сечением жилы до 800мм^2 [**5**].

Фазовые регуляторы типа РОТ являются быстродействующими электронными устройствами, способными в широких пределах регулировать ток в нагрузке. КПД фазового регулятора 95%. Размеры такого устройства (310х280х260)мм, вес 11 кг. Управление регулятором осуществляется с помощью электронного блока, на который подается специальный синхроимпульс. Органы управления регулятором установлены на лицевой панели самого регулятора. Сами же фазовые регуляторы устанавливаются в пульте управления. В этом же пульте устанавливаются все аппараты управления установкой, сигнализация и приборы для контроля тока. Измерение тока в каждой жиле производится с помощью амперметра, расположенного на лицевой панели стойки управления. Каждая жила кабеля питается от своего индивидуального тиристорного преобразователя РОТ, который обеспечивает в жиле необходимую плотность тока. Вторые концы жил 3-х жильного кабеля соединяются межу собой и изолируются от корпуса котла (рис.5).

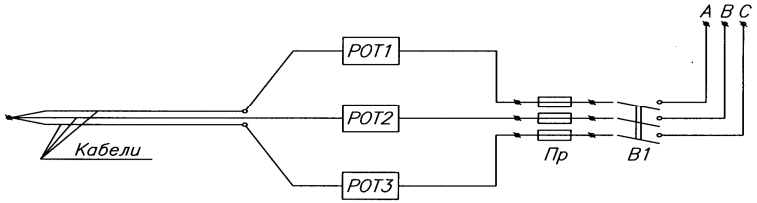


Рис. 5 – Схема подключения тиристорных преобразователей

При таком подключении кабеля к источнику питания все токи, протекающие по жилам кабеля, компенсируются, исчезает магнитное поле, а нагрузка превращается в чисто активное сопротивление. Так как согласно правилу Кирхгофа алгебраическая сумма токов I_K, сходящихся в точке разветвления проводников, равна нулю

$$\sum_{K=1}^{\ell} I_K = 0, \qquad (2)$$

где ℓ – число сходящихся токов, поэтому напряженность магнитного поля возле котла будет равна нулю.

Вновь созданная установка на базе тиристорных регуляторов типа РОТ- 630 позволяет плавно изменять напряжение 0…380 В на каждой жиле в отдельности и обеспечить необходимую плотность тока в каждой жиле, в связи с чем уменьшается время нагревания электрического кабеля в бумажной изоляции до необходимой температуры и увеличивается скорость сушки (рис.6).

Система автоматического управления процессом сушки и пропитки кабеля с бумажной изоляцией. На установке сушки – пропитки бумажной изоляции силовых кабелей внедрена система управления технологическим процессом на базе программируемого контроллера фирмы Siemens. Система позволяет выполнять функции автоматического контроля температуры, давления, плотности тока в жилах кабеля, уровня пропитывающего состава, времени технологического процесса. Выполняются функции автоматического управления работой вакуумных насосов, регулятором однофазным тиристорным (РОТ). Функции диалогового режима обеспечивают оперативную связь между персоналом и системой управления с помощью панели оператора. На экране панели оператора отображается мнемосхема технологического процесса, графики изменения температуры в корзинах и тока в жилах кабеля, давления от времени. Значения температуры, тока, давления распечатываются в виде протокола. Система сигнализирует о неисправностях в работе оборудования, а также при отклонениях контролируемых параметров от заданных значений. Оптимальный режим сушки – пропитки кабеля с бумажной изоляцией может быть реализован только с использованием системы автоматического управления технологическим процессом. Система управления позволяет оптимизировать процесс сушки – пропитки по минимальному потреблению энергии. Все поставленные задачи управления процессом, и особенно алгоритмы оптимального управления процессом сушки, решены с помощью цифровой системы управления. Кроме того, цифровая система управления позволяет реализовывать различные алгоритмы управления и оптимизации, вести статистическую обработку различных технологических процессов и по результатам анализа совершенствовать технологические процессы.

Система управления содержит: блок управления, цифро-аналоговый преобразователь, мультиплексор, многоканальный цифро-аналоговый преобразователь, исполнительный механизм управления оборудованием, измерительный преобразователь давления, измерительный преобразователь температуры, аналого-цифровой преобразователь, мультиплексор, многоканальный аналого-цифровой преобразователь

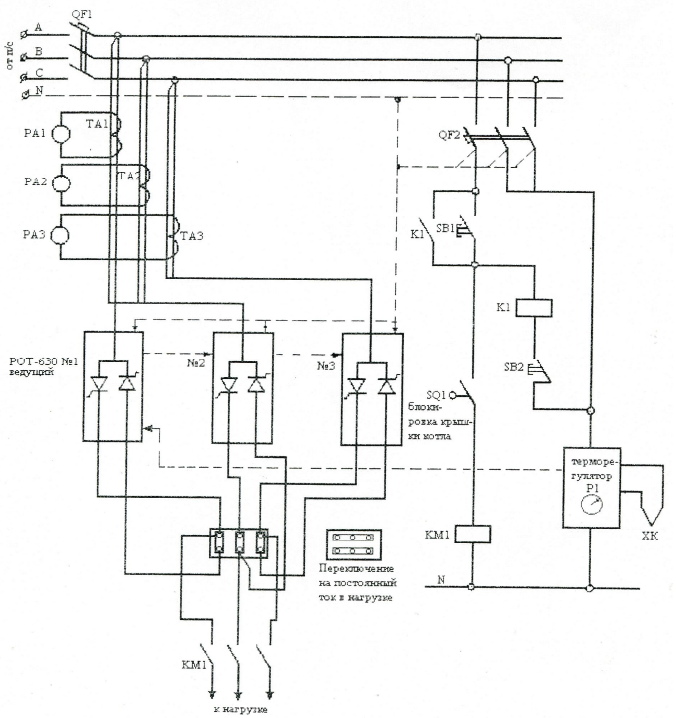


Рис. 6 – Схема трехфазного регулятора на базе однофазных регуляторов типа РОТ-630

.

Таблица 3 – Перечень контролируемых и управляемых параметров

№п/п	Наименование параметров	Вид	Сигнал	Количество, шт.
1	Температура в корзине	анал.	0-50 мВ	12
2	Ток в жилах кабеля	анал.	4-20 мА	18
3	Давление в котле	анал.	4-20 мА	3
4	Уровень пропиточного состава в котле	анал.	4-20 мА	3
5	Сопротивление изоляции кабеля в корзине	анал.	4-20 мА	6
6	Управление РОТ	анал.	0-5 мВ	18
7	Закрытие крышки котла	дис.	контакт	3
8	Работа вакуумного насоса.	дис.	контакт	6

Функции автоматического контроля:

- контроль температуры изоляции;
- контроль давления в котле;
- контроль тока в жилах кабеля;
- контроль сопротивления изоляции;
- контроль уровня пропиточного состава в котле;
- контроль времени технологического процесса;
- контроль готовности котла к пуску;
- контроль за работой регулятора однофазного тиристорного (РОТ);
- контроль за работой вакуумных насосов.

Функции автоматического управления:

1. включение РОТ;
2. поддержание заданной величины тока в жилах кабеля;
3. поддержание заданной температуры кабеля ;
4. включение вакуумных насосов;
5. отключение РОТ;
6. выключение вакуумных насосов;
7. подача пропиточного состава в котел;
8. удаление пропиточного состава из котла.

Функции диалога обеспечивают организацию оперативной связи между персоналом и системой управления с помощью панели оператора MP270, рис.7.

На экране панели оператора отображается график изменения температуры в корзинах, тока в жилах кабеля и сопротивления изоляции. управления протоколами, экран дистанционного управления, схемы технологического процесса сушки-пропитки электрического кабеля с бумажной изоляцией, рис. 8.

Рис. 7 – Панель оператора

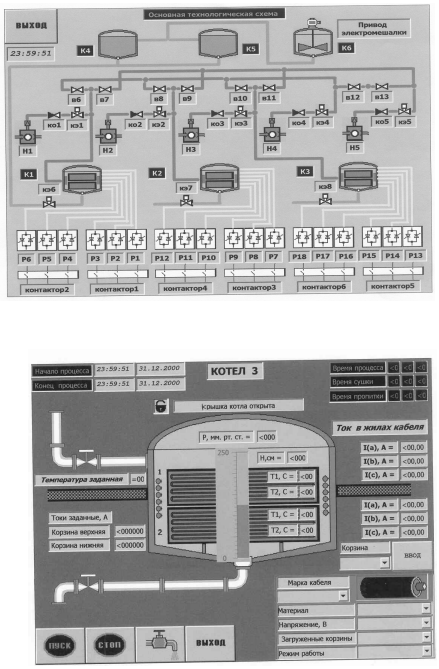


Рис. 8 – Экраны панели оператора

Схема (рис. 8) показывает, какие задействованы в работе котлы, какие включены вакуумные насосы и РОТ, какие открыты вакуумные клапана и указывает номер котла и корзины, время, дату включения установки, марку кабеля, изменение температуры и тока, кабеля, давления в корзине, время сушки кабеля, время пропитки кабеля, время выключения установки для сушки-пропитки кабеля с бумажной изоляцией. Существенной особенностью пользовательского интерфейса системы управления является использование интуитивно понятной модели представления информации и взаимодействия с оператором, что позволило добиться высокой эффективности работы персонала. Время, необходимое на подготовку оператора для работы с системой управления в среднем составляет около 10 минут.

Выводы. Модернизация установки сушки-пропитки бумажной изоляции силовых кабелей позволила:

- сократить более чем в 2 раза энергетические затраты на сушку электрического кабеля с бумажной изоляцией;

- усовершенствовать технологический процесс сушки-пропитки кабельных изделий с бумажной изоляцией, сократить время сушки более чем в 1,5 раза, устранить брак кабельной продукции;

- обеспечить минимальное остаточное давление в сушильно-пропиточном котле, повысить качество сушки и пропитки, а также надежность работы вакуумной установки;

- ускорить процесс нагревания кабеля, повысить оперативность управления технологическим процессом, плавно изменять напряжение на жилах кабеля, обеспечивать заданную плотность тока в жилах кабеля, устранить магнитное поле вокруг котла;

- увеличить пропускную способность вакуумных коммуникаций, уменьшить металлоемкость установки и увеличить скорость сушки бумажной изоляции;

- создать систему управления технологическим процессом на базе программируемого контроллера фирмы Siemens технологического контроля на различных операциях сушки-пропитки электрического кабеля с бумажной изоляцией, что позволило исключить возможность появления брака и усовершенствовать технологический процесс;

- улучшить условия труда обслуживающего персонала, повысить культуру производства, снизить загрязнение окружающей среды, уменьшить занимаемые производственные площади;

- производить кабель с сечением токопроводящей жилы до 800мм^2, вместо ранее существовавшего ограничения до 240мм^2.

Список литературы.**1.** *Третьяков В.М.* Сушка и пропитка силовых кабелей / *В.М. Третьяков, С.Д. Холодный*.– М.: Энергия, 1978.-136с. **2.** А.с.346. Россия**,** МПК H01B13/30**.** Вакуумная сушильно-пропиточная установка / *В.П. Алексеенко, В.П. Карпушенко, В.А. Кутовой и др*.**–** № 93016105; заявл. 29.03.93; опубл.15.04.95, Бюл. №4. **3.** *Карпушенко В.П.* Силовые кабели на напряжение 1-10кВ / *В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко*.– Харьков: Факт, 1998. – С.96-104. **4.** *Карпушенко В.П.* Силові кабелі низької та середньої напруги / *В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко*. Харків, «Регіон-інформ». 2000.- С.113-117. **5.** А.с. 2047. Россия, МПК H01B13/00. Сушильно-пропиточная установка для изготовления кабелей/ *В.П.Карпушенко, В.А. Кутовой, В.И Маханьков, И.Б Пешков*. – №95101099; заявл. 25.01.95; опубл.16.04. 96, Бюл. №4. **6.** *Золотарев В.М.* Мониторинг показателей качества бумажной изоляции силовых кабелей напряжением 10 кВ на заводе "Южкабель" / *В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антонец, Н.П.Чувурин, Л.А.Щебенюк* // Вісник Харківського державного політехнічного університету.- Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 88.- С. 22-31. **7.** *Гурин А.Г.* Способ технологического контроля изоляции бумажно-масляных кабелей в процессе сушки и пропитки / *А.Г. Гурин, Б.Г. Набока* // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 64.- С. 5-10. **8.** *Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С.* Обследование трехфазных кабелей в металлической оболочке // Электричество. – 2011.– №1.– С. 48-54. **9.** *Куц П.С.* Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции / *П.С. Куц, И.Ф. Пикус*.- Минск: Наука и техника, 1979.– 275 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2011

УДК 621.316: 621.316.1

А.В.ЕФИМОВСКИЙ, соискатель, НТУ «ХПИ»
Ю.В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
Е.С. КОБЕЦ, магистр, НТУ «ХПИ»

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ В РЕЖИМЕ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрен вопрос дополнительных потерь в синхронных двигателях обусловленных генерацией реактивной мощности при разных режимах работы и параметрах сети питания. В сводной таблице приведены области дополнительных потерь для разных моделей двигателей.

Розглянуто питання додаткових втрат в синхронних двигунах обумовлених генерацією реактивної потужності при різних режимах роботи і параметрах мережі живлення. У звідній таблиці приведені області додаткових втрат для різних моделей двигунів.

The question of additional losses is considered in synchronous engines conditioned by the generation of reactive-power at different office hours and parameters of feed-in network. In a summary table areas over of additional losses are brought for the different models of engines

Постановка проблемы. Одним из основных вопросов при рассмотрении использования синхронных двигателей (СД) для компенсации реактивной мощности (КРМ) является наличие дополнительных потерь активной мощности ΔР, которые идут на выработку реактивной мощности (РМ). В общем случае эти потери являются функцией трёх величин [1]:

$$\Delta P = f(\alpha, \beta, U), \qquad (1)$$

где α – коэффициент загрузки СД по реактивной мощности, β - коэффициент загрузки СД по активной мощности и U – напряжение питания СД. Если коэффициент β и напряжение сети U являются величинами известными для конкретного предприятия, то коэффициент загрузки по реактивной мощности можно изменить посредством изменения тока возбуждения двигателя. Минимальный коэффициент α выбирается исходя из условий статической и динамической устойчивости СД [2]. Как правило, при минимально возможном токе возбуждения (режим недовозбуждения) СД сам является потребителем РМ, т.е. ведёт себя как активно-индуктивная нагрузка. Это редкий и в большинстве случаев невостребованный режим его работы. Поэтому при избытке РМ в узле нагрузки, СД выгодней переводить в режим работы с cosφ=1, в котором потери в СД будут минимальны [3].

Располагаемая (максимальная) РМ генерируемая СД, определяется тепловым режимом СД с учётом форсировки возбуждения при

кратковременных снижениях напряжения [4]. На тепловой режим работы СД также влияют конструктивные особенности двигателя, материал изоляции обмоток, коэффициент загрузки по активной мощности β и напряжение сети. Поэтому для каждой модели СД максимальный коэффициент загрузки по РМ $\alpha_м$ определяется опытным путём.

Анализ последних исследований и публикаций. Во ВНИИЭ ещё в 1967 году была проведена работа по определению возможности генерирования РМ СД и предложена методика определения относительной величины располагаемой реактивной мощности $\alpha_м$ и дополнительных потерь ΔP. В литературе [4] приведена таблица усреднённых значений коэффициента $\alpha_м$ для двигателей серий СДН, СТД, и СД3 при различных коэффициентах β и напряжениях питания. Также представлена формула для определения дополнительных потерь, которая также приводится в других источниках [1, 5]:

$$\Delta P = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СД\,ном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}^2}{Q_{СД\,ном}^2} \qquad (2)$$

где $D1$, $D2$– коэффициенты, зависящие от мощности и КПД СД, имеющие размерность кВт. Для каждой марки двигателя они индивидуальны и являются справочными величинами. Хотелось бы отметить, что в литературе [6] представлена дополненная формула (2), которая выглядит следующим образом:

$$\Delta P = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СД\,ном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}^2}{Q_{СД\,ном}^2} + D_3 \qquad (3)$$

где $D3$ – коэффициент учитывающий потери в самой системе возбуждения СД. Величина этого коэффициента составляет 5-25 % от суммы $D1$ и $D2$. Так как сейчас большинство СД снабжены тиристорной системой возбуждения, которая имеет наиболее низкое потребление энергии, то при расчётах в данной статье коэффициент $D3$ был исключен.

Цель статьи. Для оценки эффективности использования синхронных двигателей в качестве источников реактивной мощности определить диапазон величин располагаемой реактивной мощности для разных типов синхронных двигателей при различных условиях их работы и параметрах питающей сети с учётом дополнительных потерь в них, обусловленных генерацией реактивной мощности.

Основные материалы исследований. На основании данных в литературе [1, 4] были произведены расчёты располагаемой реактивной мощности и дополнительных потерь ΔP при различных коэффициентах загрузки β и напряжениях питания для двигателей серий СДН, СТД и СД3. Для оценки эффективности использования СД в качестве КРМ были определены удельные потери активной мощности на выработку реактивной имеющие размерность кВт/квар.

Все СД выпускаемые промышленностью можно разбить на три класса:

- двигатели напряжением 6, 10 кВ с частотами вращения от 100 до 1000 об/мин и номинальной мощностью от 400 до 10000 кВт (серия СДН).

- турбодвигатели напряжением 6, 10 кВ с частотой вращения 3000 об/мин и номинальной мощностью от 630 до 12500 кВт (серия СТД).

- двигатели напряжением 380 В с частотами вращения от 375 до 1000 об/мин номинальной мощностью от 160 до 400 кВт (серия СД3).

Двигатели напряжением 6 и 10 кВ серии СДН являются самым распространённым типом СД. Расчёты показали, для всех скоростей вращения можно однозначно утверждать, что чем мощнее двигатель, тем меньше относительные удельные потери $P_{уд}$ (кВт/квар). Для примера на графике (рис. 1) приведены зависимости дополнительных удельных потерь двигателей напряжением питания 6 кВ и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту при номинальном напряжении питания.

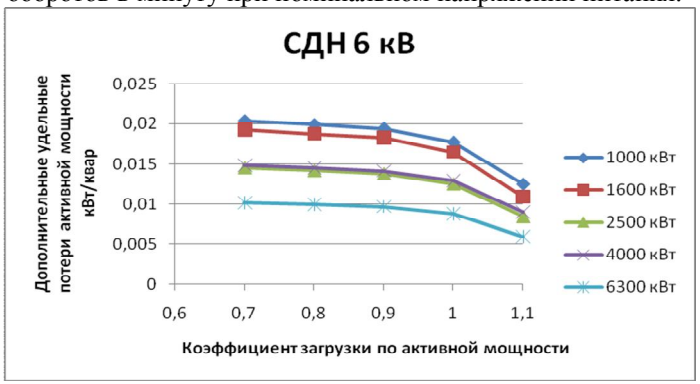


Рис. 1 – Зависимость дополнительных удельных потерь двигателей напряжением питания 6 кВ и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту при номинальном напряжении питания

Также из рисунка 1 можно сделать вывод, что при коэффициентах загрузки от 0,7 до 0,9 дополнительные удельные потери изменяются незначительно. Для двигателей со скоростью вращения ниже 1000 оборотов в минуту характер диаграммы остаётся такой же (рис. 2).

На рисунке 2 приведены зависимости дополнительных удельных потерь для двигателей номинальной мощностью 2500 кВт с разными скоростями вращения и номинальном напряжении питания, при этом из графика видно, чем меньше скорость вращения, тем выше дополнительные удельные потери активной мощности на выработку реактивной.

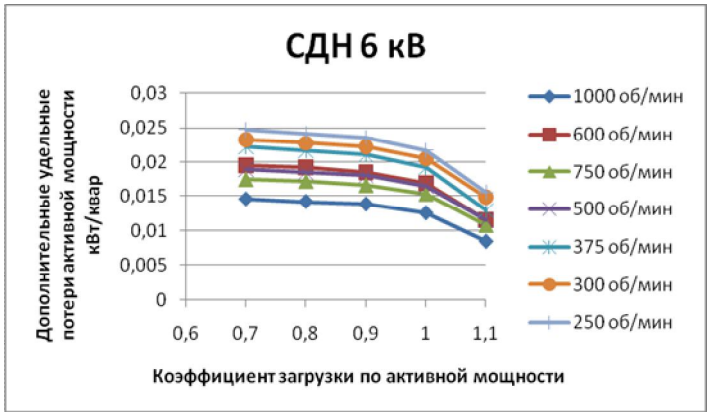


Рис. 2 – Зависимость дополнительных удельных потерь для двигателей номинальной мощностью 2500 кВт с разными скоростями вращения и номинальном напряжении питания

Так как вопросы компенсации реактивной мощности тесно взаимосвязаны с уровнем напряжения в сети, то представляет интерес рассмотреть, как изменяется располагаемая реактивная мощность и дополнительные удельные потери активной энергии при различных значениях питающего напряжения. В качестве примера на рисунках 3 и 4 представлены такие зависимости для двигателя СДН - 15-64-6 мощностью 2500 кВт и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту.

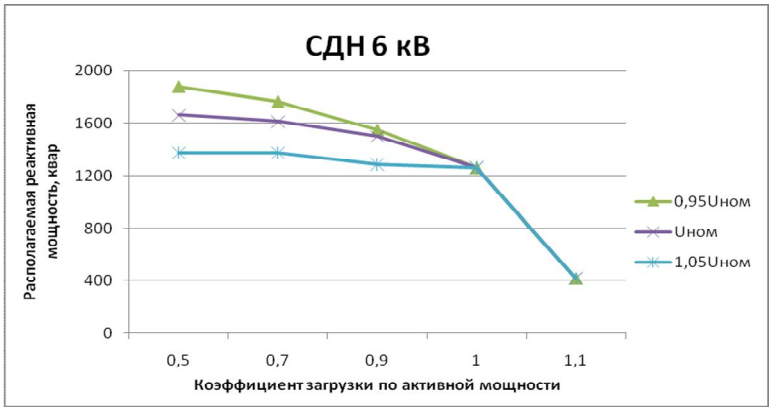


Рис. 3 – Зависимость располагаемой реактивной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности при различных значениях питающего напряжения для двигателя СДН 6 кВ

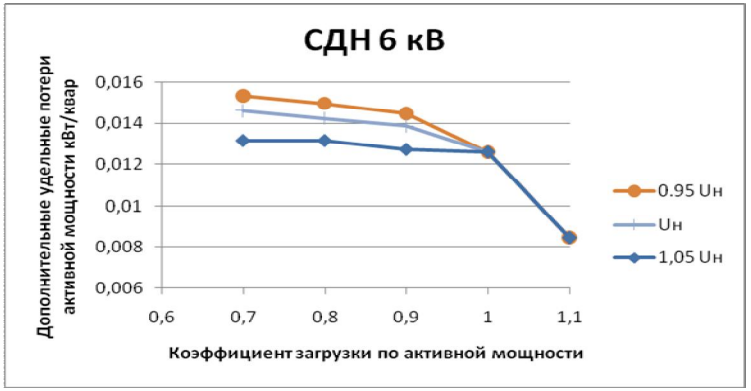


Рис. 4 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности при различных значениях питающего напряжения для двигателя СДН 6 кВ

Как видно из диаграмм (рис. 3, 4), при снижении напряжения питания повышается располагаемая РМ СД, но при этом увеличиваются дополнительные удельные потери активной мощности.

При рассмотрении второй большой группы СД – турбодвигателей серии СТД напряжением 6, 10 кВ, исследования показали, что закономерности в части генерации реактивной мощности аналогичны двигателям серии СДН. Это подтверждается приведенными в качестве примера на рисунках 5 и 6 графиками зависимости удельных потерь активной мощности для двигателя СТД-2500-2 мощностью 2500 кВт.

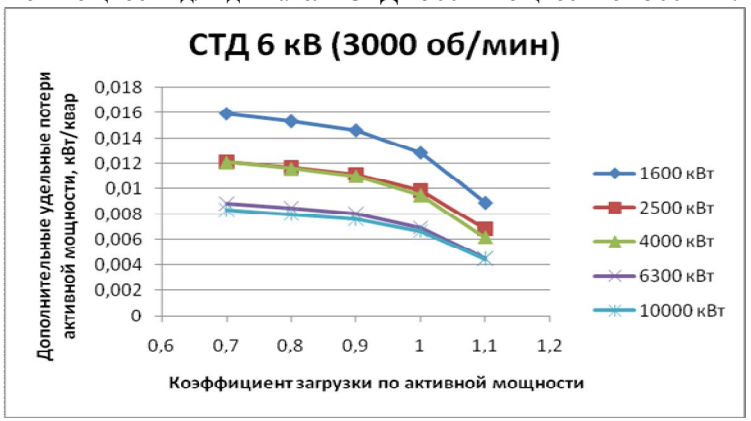


Рис. 5 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности для двигателя СТД 6 кВ

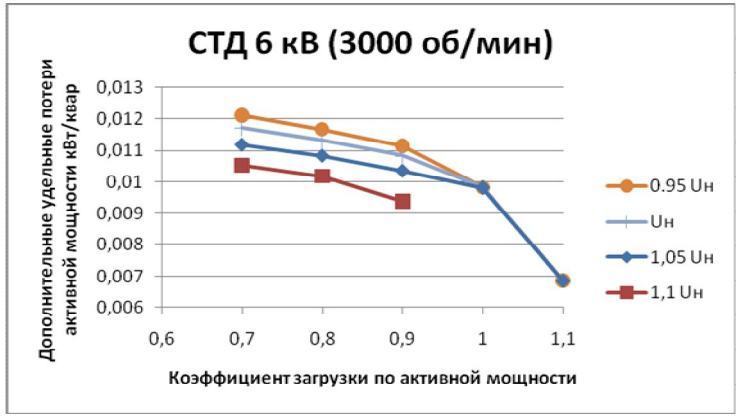


Рис. 6 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности при различных значениях питающего напряжения для двигателя СТД 6 кВ

Последняя самая немногочисленная группа - это двигатели напряжением 380 В. Как правило, их не используют в целях КРМ. В литературе [3, 7] даются рекомендации, что выгоднее переводить такие двигатели в режим работы с cosμ=1, т.е. минимизировать потери в самом СД. Из рисунка 7 видно, что действительно уровень удельных дополнительных потерь высок по сравнению с высоковольтными СД.

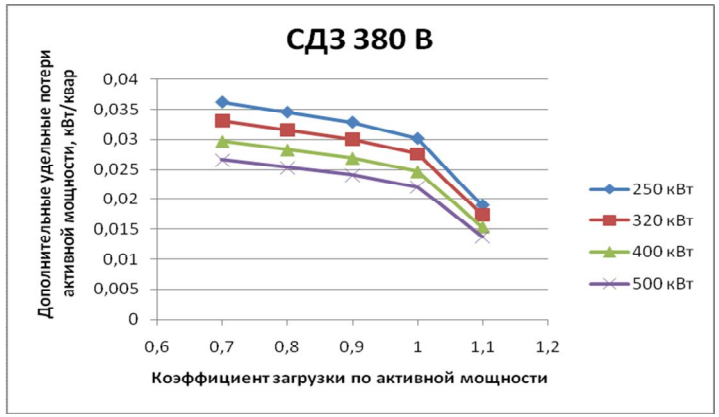


Рис. 7 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности для двигателя СДЗ 380 В

В таблице 1 представлены сводные данные по СД при номинальном напряжении питания.

Таблица 1 – Сводные данные по синхронным двигателям

Серия СД	Мощность СД, кВт	Скорость вращения, об/мин	Уровень удельных дополнительных потерь активной мощности при коэф. загрузки 0,7…1 и напряжениях питания 0,9Uн…Uн, кВт/квар
СДН 6 (10) кВ	1000, 1600	250, 300	0,03-0,04
		375, 500	0,02-0,033
		600, 750	0,018-0,028
		1000	0,016-0,021
	2500, 4000	250, 300	0,016-0,025
		375, 500	0,013-0,023
		600, 750	0,012-0,02
		1000	0,012-0,015
	6300	500	0,011-0,015
		600, 750	0,01-0,011
		1000	0,009-0,011
СТД 6 (10) кВ	1000, 1600	3000	0,012-0,016
	2500, 4000	3000	0,01-0,012
	6300,10000	3000	0,006-0,009

Проведенные исследования показывают, что хотя в ряде случаев удельные потери в СД, обусловленные генерацией РМ и соизмеримы с потерями в конденсаторных установках КРМ (см. табл. 1), однако при решении вопроса о целесообразности использования конкретного СД в качестве КРМ необходимо учитывать полные потери в СД, состоящие из механических, магнитных, электрических потерь и дополнительных потерь вызванных генерацией РМ.

Следует отметить также, что хотя величина удельных дополнительных потерь, обусловленных генерацией РМ, может изменятся в широких пределах в зависимости от типа двигателя , коэффициента загрузки по активной мощности, скорости вращения, напряжения питания, фактический диапазон этих изменений ограничен условиями эксплуатации конкретного СД. В частности, коэффициент загрузки СД по активной мощности для большинства случаев эксплуатации выбирается в диапазоне 0, 7 – 0,8 и может быть изменен только на стадии проектирования электропривода, как и скорость вращения СД для конкретных условий эксплуатации. Располагаемая

(генерируемая) же РМ будет определяться необходимостью компенсации РМ конкретной нагрузки объекта электроснабжения.

Выводы: 1. Чем больше номинальная мощность и скорость вращения СД, тем ниже дополнительные удельные потери, при этом у двигателей мощностью 10000 и 12000 кВт величина удельных потерь приближается к уровню конденсаторных установок, поэтому использование СД серии СТД в качестве КРМ имеет приоритет.

2. В отличии от конденсаторных установок при снижении напряжения питания располагаемая реактивная мощность СД увеличивается при практически пропорциональном увеличении дополнительных удельных потерь активной мощности в СД.

3. Двигатели на напряжение 380 В в силу высокого уровня дополнительных активных потерь не привлекательны для целей компенсации реактивной мощности. Их выгоднее использовать в режиме с cosφ=1, при котором потери в них минимальны.

Список литературы:1. *Карпов Ф. Ф.* Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / *Ф. Ф. Карпов*. – М. : Энергия, 1975. **2.** *Петелин Д.П.* Автоматическое управление синхронными электроприводами / Д.П. Петелин. – М. : Энергия, 1968 г. **3.** *Ипатенко Н. Р.* Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство cosμ=1 / *Н. Р. Ипатенко*. Брянск, 1974. **4.** Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Том I. Электроснабжение / под ред. *А. А. Фёдорова*. – М. : Энергоатомиздат, 1986. **5.** *Железко Ю. С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчётов – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.: ил. **6.** *Абрамович Б. Н., Круглый А. А.* Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей / *Б. Н. Абрамович, А. А. Круглый*. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. – 128 с. **7.** *Чиликин М. Г.* Синхронные приводы / *М. Г.Чиликин.* – М. :Энергия, 1967. – 80 с.

Поступила в редколлегию 30.05.2011

УДК 621.314

О.А. ЗАГАЙНОВА, асистент, НТУ «ХПІ»

АНАЛІЗ ПОГРІШНОСТІ ПРИСТРОЮ БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПУ У МАСЛОНАПОВНЕНОМУ ВИСОКОВОЛЬТНОМУ УСТАТКУВАННІ

У статті проведено аналіз погрішності пристрою безперервного контролю електричних параметрів ізоляції конденсаторного типу маслонаповненого високовольтного устаткування по напрузі і куту залежно від навантаження вторинних ланцюгів трансформаторів напруги для ряду типових схем розподільних пристроїв підстанцій.

В статье проанализирована погрешность устройства непрерывного контроля электрических параметров изоляции конденсаторного типа маслонаполненного высоковольтного оборудования по напряжению и углу в зависимости от нагрузки вторичных цепей трансформаторов напряжения для ряда типовых схем распределительных устройств подстанций.

In the article the error of device of continuous control of electric parameters of isolation of condenser type of the oil-immersed high-voltage equipment is analysed from an error on tension and corner of measurings transformers of tension of substation depending on loading of the second chains of transformers of tension for the row of model charts of distributive devices of substations.

Постановка проблеми. Основою підвищення ефективності, надійності високовольтного маслонаповненого устаткування є вдосконалення методів неруйнівного контролю і діагностики.

Підвищення достовірності контролю і діагностики високовольтного маслонаповненого устаткуванн – це комплексне наукове задача, вирішення якой залежить у тому числі і від підвищення точності перетворень первинної інформації.

Контроль характеризується достовірністю, яка кількісно оцінюється вірогідністю того, що результат контролю відповідає дійсному стануоб'єкту контролю (високовольтних вводів та трансформаторів струму) [1-3]. Основною причиною зниження достовірності може бути наявність погрішностей виміру контрольованого параметра.

Основними джерелами погрішностей про параметр контролю високовольтних вводів та трансформаторів струму (tg, ємкість і т. д.), що міститься в результатах вимірів контрольованих величин за допомогою пристроів безперервного контролю об’єктів під робочою напругою є наступні:

– погрішності технічних вимірів в ході контролю (квантування за розміром безперервної вимірюваної величини, представлення інформації середніми значеннями сигналів, що дискретизують, кусочно-лінійною апроксимацією при відновленні сигналів, визначення робочої фазної

напруги об'єкту з використанням параметрів трансформаторів напруги апаратної частини пристрою і вимірювальних трансформаторів напруги ПС) [4];

– погрішність формалізованого опису об'єкту контролю (високовольтних вводів та трансформаторів струму), особливо з врахуванням впливаючих електроустановок [5];

– обмеження на збір первинної вимірювальної інформації на етапі навчання системи контролю і діагностики [6];

– нестаціонарна контрольованих величин в часі [7].

В [8] наведен ватметровий метод, що дає практичне співпадіння результатів вимірювань $tg\delta$ ізоляції вводів трансформаторів струму 330 кВ з даними вимірювань мостовою схемою при напрузі 10 кВ. Метод базується на вимірюванні потужності втрат. Згідно [9], при реалізації цього методу кола напруги схеми живляться від вторинної обмотки трансформатора напруги підстанції, а струмові кола – через узгоджувальний трансформатор струму, що необхідний для розв'язки кіл заземлення об'єкта контролю і трансформатора напруги. Виключення систематичної погрішності досягається при цьому введенням в схему вимірювань пристрою для створення кутового зсуву, що дорівнює сумарному зсуву фаз, або відніманням від результатів вимірів відповідної поправки.

Мета, задачі дослідження. Проаналізувати погрішність пристрою безперервного контролю електричних параметрів ізоляції конденсаторного типу маслонаповненого високовольтного устаткування по напрузі і куту трансформаторів апаратної частини пристрою і вимірювальних трансформаторів напруги підстанції залежно від навантаження вторинних ланцюгів трансформаторів напруги для ряду типових схем розподільних пристроїв підстанцій.

Основний матеріал досліджень. На рис. зображена спрощена структурна схема програмної реалізації способу контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів і вимірювальних трансформаторів струми під робочою напругою. Задача вирішується у такий спосіб: вимірюють навантаження і коефіцієнт потужності навантаження вимірювального трансформатора напруги, приєднаного до тієї ж фази системи шин, що і контрольований об'єкт, при відсутності дефекту і при контролі, розраховують його погрішність в напрузі і кутову, з компенсацією яких визначають фазну напругу об'єкта контролю і результат опосередкованих вимірювань потужності втрат, а також запам'ятовують значення робочої фазної напруги при відсутності дефекту та множать при кожному контролі результат опосередкованих вимірювань потужності втрат в ізоляції контрольованого об'єкта на квадрат відношення робочих фазних напруг при відсутності дефекту і при контролі.

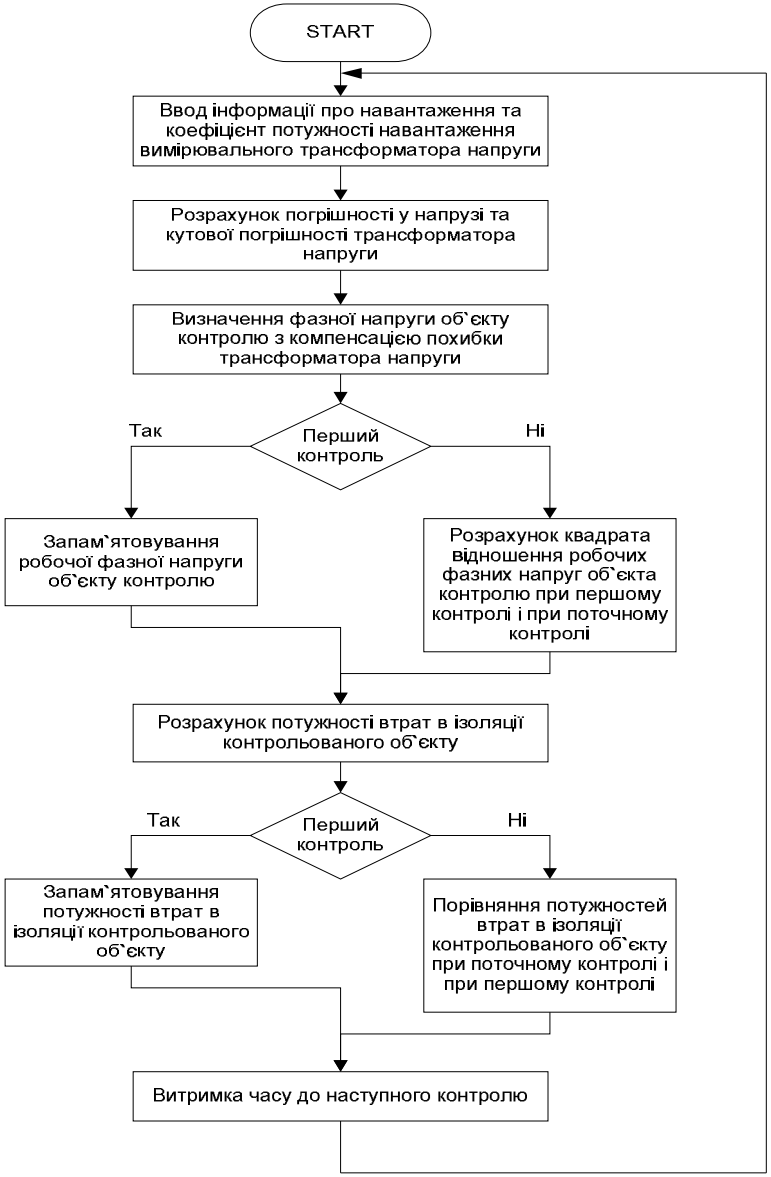


Рис. - Алгоритм контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів та вимірювальних трансформаторів струму під робочою напругою

Згідно [8], при контролі під робочою напругою методи, що використовують зміну у часі діелектричних втрат, найбільш ефективні при дефектах в твердій ізоляції, що знаходяться в ізоляційному остові виробу.

Окрім того, компенсація погрішності в напрузі і кутової вимірювального трансформатора напруги дозволяє забезпечити реєстрацію дефекту, що розвивається, в ізоляції конденсаторного типу. Граничні значення параметрів при безперервному контролі [8] наступні:

клас напруги, кВ	$\Delta \mathrm{tg}\delta$ та $\Delta Y / Y_0$, %
110-220	3,0,
330-500	2,0,
750	1,5.

При цьому признаку дефекту, що розвивається, відповідає, згідно [8], значення $\Delta \mathrm{tg}\delta$ ($|\Delta Y / Y_0|$) > 0,5%.

Проаналізуємо можливість реєстрації дефекту з використанням запропонованого способу контролю на прикладі контролю ізоляції вводів 330 кВ автотрансформатора ПС «Артема-330кВ.

Так для вводів 330 кВ з параметрами C = 627 пФ та tgδ = 0,57 при $U_{\text{роб}}$ = = 339,15/ √3 кВ маємо струм витоку $\underline{I}$ = 38,599 $\angle 89{,}67^0$ мА та його активну складову $I_{\text{А}}$=0,22 мА.

Потужність втрат відповідно складає P=43,13 Вт. Признаку дефекту, що розвивається, за умови $\Delta \mathrm{tg}$ > 0,5 % та при незмінності напруги об'єкта контролю $U_{\text{роб}}$ = const відповідає зміна потужності втрат ΔP = 0,22 Вт, граничному значенню Δtgδ = 2% відповідає ΔP = 0,86 Вт.

Реєстрація дефекту, що розвивається, з використанням способу контролю потужності втрат означає, що спосіб забезпечить можливість реєстрації, якщо максимальне значення абсолютної погрішності опосередкованих вимірювань потужності втрат в ізоляції об'єкта буде меншою, ніж ΔP = 0,22 Вт. Виконаємо оцінку середнього квадратичного відхилення випадкової погрішності $S_{\text{вим}}$ результату опосередкованого вимірювання потужності втрат.

Скориставшись наведеними в роботі [9] даними про оцінки S_U та S_{I_A} (оцінка середнього квадратичного відхилення погрішності результату вимірювань $\underline{I}$) при контролі зміни повної провідності ізоляції вводів 330 кВ автотрансформатора ПС «Артема-330кВ», що дорівнюють відповідно $S_U = 369{,}228\,B$ та $S_I = 0{,}028 \cdot 10^{-3}\,A$ і оцінивши S_{I_A} по S_{I} як $S_{I_A} = S_I \cdot I_A \,/\, |\underline{I}| = 0.16 \cdot 10^{-6}$ А, отримуємо оцінку $S_{\text{вим}}$:

$$S_{\text{вим}} = \sqrt{(0{,}22 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 369{,}228^2 + \left(\frac{339{,}15}{\sqrt{3}} \cdot 10^3\right)^2 \cdot (0{,}16 \cdot 10^{-6})^2} = 0{,}087 \text{ Вт}.$$

Таким чином, довірчий інтервал потужності втрат в ізоляції розглядаємих вводів 330 кВ при відсутності дефекту складає:

$P = 43{,}13 \pm 3S_{\text{вим}}$ =42,87…43,39 Вт, і при цьому є можливість реєстрації дефекту при $\Delta \mathrm{tg}\,\delta = 2\%$, коли зміна потужності втрат складе:

P = 43,7…44,25 Вт.

Звичайно, компенсація погрішності в напрузі і кутової вимірювального трансформатора напруги приведе до зменшення значення S_U.

Висновки. Таким чином, запропонований спосіб контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів і вимірювальних трансформаторів струму під робочою напругою дозволяє класифікувати дефекти і реєструвати дефекти, що розвиваються, тобто підвищує достовірність контролю.

Погрішність в напрузі і кутова вимірювального трансформатора напруги залежить від його навантаження і коефіцієнта потужності навантаження, які можуть змінюватись в залежності від поточної схеми електроустановки (нормальна, ремонтні); крім того, навантаження й коефіцієнт потужності навантаження різняться залежно від типових схем розподільчої установки. Компенсація погрішності вимірювального трансформатора напруги з урахуванням означеного вище дозволяє удосконалити діагностику.

Список літератури: **1**. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення: ДСТУ 2389-94. – [Чинний від 1995-01-01]. - К.: Держстандарт України 1994. - 24 с. – (Національний стандарт України). **2**. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення: ДСТУ 2865-94. – [Чинний від 1996-01-01]. - К.: Держстандарт України 1995. - 52 с. – (Національний стандарт України). **3**. *Володарський Є.Т.* Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. / *Є.Т .Володарський, Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б.*. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с. **4**. *Клюев В.В.* Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / *В.В.Клюев, Соснин Ф.Р.,Филинов В.Н.* и др.; под ред. *В.В. Клюева*. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. **5**. *Минченко А.А.* Совершенствование диагностики высоковольтной изоляции конденсаторного типа на основе учета пространственно распределенных емкостных токов: дис. канд. техн. наук, Харьков, 2006. -277 с. **6.** *Штефан Н.В.* Методи та алгоритми ефективної обробки результатів вимірювального експерименту: дис. канд. техн. наук: 05.11.15 / *Наталя Володимірівна Штефан* – Х., 2004. – 161 с. **7.** *Нечипорук В.В.* Метод підвищення точності систем діагностики технічного обладнання на основі стаціонаризації вимірювальної інформації: дис. канд. тех. наук: 05. 11. 16 / Віталій Володимирович Нечипорук – К., 2007. – 115 с. **8**.*Сви П.М*. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / *П.М Сви.* – М.:Энергоатомиздат,1992. – 239 с. **9.** Пат. 56978 Україна, МПК GO1R 31/08. Спосіб контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів та вимірювальних трансформаторів струму під робочою напругою / *Загайнова О.А., Богатирьов І.М., Мінченко А.А.,* заявник та патентовласник *НТУ «ХПІ»-№и 2010 04400,* заявл. 15.04.2010; опубл. 10.02.2011. Бюл. №3.

Поступила в редколегію 20.10.2011

УДК 621.316

А.П. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
Ю.В. ПРОХОРЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В БЫТОВЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

В статье идет речь о необходимости компенсации реактивной мощности в бытовом секторе. Обсуждаются проблемы оптимальной компенсации реактивной мощности. Представлены устройства для компенсации реактивной мощности у потребителей. Делается вывод, что установление компенсирующих устройств у потребителей является актуальной темой.

У статті йде мова про необхідність компенсації реактивної потужності в побутовому секторі. Обговорюються проблеми оптимальної компенсації реактивній потужності. Представлені пристрої для компенсації реактивної потужності у споживачів. Робиться висновок, що встановлення компенсуючих пристроїв у споживачів є актуальною темою.

The text deals with the necessity of reactive power compensation in household electric power supply systems. The problems of the optimum reactive power compensations are discussed. It is shown devices for reactive power compensations at consumers. It is concluded that the setting of the reactive power compensations devices at consumers is the most actual theme.

Стремительное развитие современной техники и технологий обуславливает рост электропотребления в бытовом секторе. При нормальных рабочих условиях все потребители электрической энергии, чей режим сопровождается постоянным возникновением электромагнитных полей (электродвигатели стиральных машин и кондиционеров, блоки питания компьютеров, люминесцентные лампы и многое другое) нагружают сеть как активной, так и реактивной составляющими полной потребляемой мощности. Протекающий реактивный ток вызывает потери мощности и энергии в линиях и трансформаторах, как энергосистемы, так и потребителя.

Однако, в распределительных сетях коммунально-бытовых потребителей, содержащих преимущественно однофазную, коммутируемую по индивидуальному режиму нагрузку, устройства компенсации реактивной мощности применяются еще недостаточно, хотя по объемам потребления на Украине этот сегмент нагрузки уверенно занимает второе место после промышленности.

Ранее было принято считать, что из-за относительно коротких фидеров городских низковольтных распределительных сетей проблемы компенсации реактивной мощности для них не существует. Если принять во внимание, что за последнее десятилетие расход электроэнергии на 1м^2 жилищного сектора увеличился втрое, средняя статистическая мощность силовых трансформаторов городских муниципальных сетей достигла 325

кВА, а зона использования трансформаторной мощности сместилась в сторону увеличения и находится в пределах 250 - 400 кВА.

Как показывает обработка графиков нагрузки, снятых на вводе многоквартирного жилого дома [1], что в течение суток среднее значение коэффициента мощности (cos φ) меняется от 0,88 до 0,97, а пофазное - от 0,84 до 0,99. Соответственно суммарное потребление реактивной мощности колебалось в пределах 9 - 14 кВАр, а пофазное - от 1 до 6 кВАр (см. рис.).

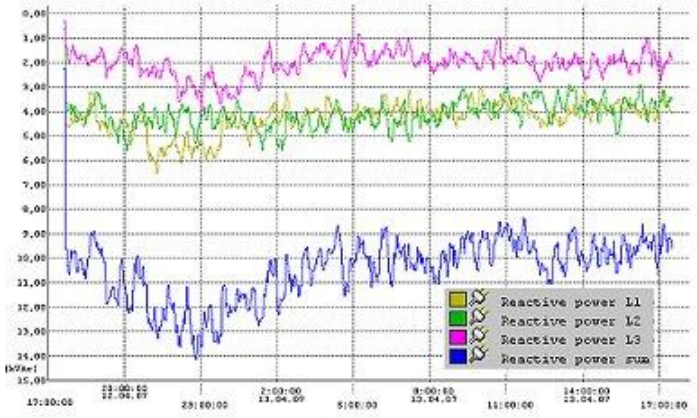


Рис. - График суточного потребления реактивной мощности на вводе многоквартирного жилого дома

Большое потребление реактивной мощности также наблюдается и фиксируется на городских подстанциях. Из таблицы видим низкие величины коэффициентов мощности на подстанции ТЭЦ-4 одного из жилых районов города Харькова.

Таблица – Общая таблица коэффициентов мощности на подстанции ТЭЦ-4 в 2010 г.

Месяц	Яч. 35, 68 Общий приём	Яч. 23, 25, 78 ХТЗ	Яч.24 ХТТЦ	Яч. 53, 56, 60 ХОЭ
Январь	0,63	0,60	0,43	0,74
Февраль	0,63	0,62	0,42	0,74
Март	0,63	0,69	0,43	0,71
Апрель	0,61	0,52	0,41	0,69
Май	0,55	0,42	0,41	0,62
Июнь	0,53	0,37	0,36	0,61
Июль	0,54	0,28	0,36	0,61

Таким образом, учитывая высокую плотность коммунально-бытовой нагрузки, постоянное наличие в перетоках мощности реактивной составляющей приводит к значительным потерям электроэнергии в распределительных сетях крупных городов и необходимости их возмещения за счет дополнительных источников генерации.

Классическим решением данной проблемы в распределительных сетях является компенсация реактивной мощности у потребителя путём установки у него дополнительных источников реактивной мощности, например, статических конденсаторов.

Сложность решения данного вопроса во многом связана с неравномерным потреблением реактивной мощности по отдельным фазам, затрудняющая применение традиционных для промышленных сетей установок компенсации реактивной мощности на базе трехфазных батарей конденсаторов, управляемых регулятором, установленным в одной из фаз компенсируемой сети.

Проблема компенсации реактивной мощности включает в себя ряд технико-экономических задач, а именно:

- проведение мероприятий для снижения реактивной мощности самих электроприемников;
- выбор типа и мест установки компенсирующих устройств.

Наиболее эффективно проводить компенсацию реактивной мощности непосредственно у потребителя, но это процесс достаточно долгий и дорогостоящий. Для получения более быстрого ощутимого результата на первом этапе необходимо провести компенсацию реактивной мощности на подстанциях, что позволит разгрузить сеть и получить энергосбережение в пределах 10-20%. Предварительно, на подстанциях в сетях 0,4 кВ необходимо выравнивание нагрузок фаз, которое производится путем переключения части абонентов с перегруженных фаз на недогруженные.

На уровне отдельных непромышленных потребителей, особенно в жилых домах с однофазной нагрузкой, выравнивание фаз таким способом произвести нельзя из-за непрерывно меняющейся величины и характера нагрузки. Поэтому компенсация реактивной мощности на объектах должна производиться на каждой отдельной фазе. При этом в каждом случае должны учитываться гармонические составляющие, при необходимости устройства по компенсации реактивной мощности должны иметь фильтры с автоматическим регулированием емкости. В данном случае важно правильно произвести подбор фильтро-компенсирующего устройства.

Таким образом, для решения задачи по компенсации реактивной мощности необходимо проводить работу в несколько этапов:

1. Централизованная (общая) компенсация, которая проводится на подстанциях и включает в себя проведение мониторинга показателей

качества электроэнергии, выравнивание фаз, фильтрацию тока и установку компенсаторов реактивной мощности;

2. Индивидуальная (точечная) компенсация проводится на уровне каждой квартиры или параллельно нагрузке, посредством подключения установок компенсации реактивной мощности (косинусных конденсаторов небольшой емкости). Данное мероприятие позволяет обеспечить синусоидальность тока, тем самым значительно уменьшая технические потери. Такие же мероприятия должны проводиться и внутри электроустановок зданий.

Важно отметить, что проблема оптимальной компенсации реактивной мощности может быть сформулирована по-разному для стадии эксплуатации и для стадии проектирования:

1) для стадии эксплуатации – это задача оптимального управления имеющимися источниками реактивной энергии;

2) для стадии проектирования – это задача оптимального размещения источников реактивной энергии.

Применение автоматических установок компенсации реактивной мощности позволяет решить ряд проблем: снизить загрузку силовых трансформаторов (при снижении потребления реактивной мощности снижается потребление полной мощности); обеспечить питание нагрузки по кабелю с меньшим сечением (не допуская перегрева изоляции); за счет частичной токовой разгрузки силовых трансформаторов и питающих кабелей подключить дополнительную нагрузку; автоматически отслеживать изменение реактивной мощности нагрузки в компенсируемой сети и, в соответствии с заданным, корректировать значение коэффициента мощности ($\cos\varphi$); уменьшить генерацию реактивной мощности в сеть; исключить появление в сети перенапряжения, т. к. нет перекомпенсации, возможной при использовании нерегулируемых конденсаторных установок.

Оборудование для решения проблем компенсации реактивной мощности у потребителей. Компенсировать реактивную мощность возможно синхронными компенсаторами, косинусными конденсаторами (конденсаторными установками), шунтирующими реакторами, фильтрами высших гармоник, статическими тиристорными компенсаторами. Применение оборудования для компенсации реактивной мощности полностью зависит от места и цели его установки.

Конденсаторные батареи предназначены для выдачи реактивной мощности в систему. Статические тиристорные компенсаторы могут работать как на выдачу, так и на потребление реактивной мощности. В электрических сетях они требуются для оптимизации режимов работы с целью повышения пропускной способности и устойчивости линий электропередачи, стабилизации напряжения в узлах нагрузки, уменьшения потерь электроэнергии и повышения ее качества.

Шунтирующие реакторы используются для компенсации емкостной реактивной мощности, генерируемой протяженными слабонагруженными линиями передач.

Фильтрокомпенсирующие устройства предназначены для снижения гармонических искажений напряжения и компенсации реактивной мощности нагрузок потребителей в сетях электроснабжения промышленных предприятий и в электрических сетях.

Синхронные компенсаторы применяют для плавного регулирования реактивной мощности в энергетических системах, для поддержания напряжения, снижения потерь электроэнергии в сетях, увеличения пропускной способности и обеспечения устойчивости энергосистем.

На электротехническом рынке также стали появляться домашние энергосберегатели. При малых габаритах и сравнительно небольшой цене, по заверениям продавцов, имеют гигантскую эффективность [2]. Данный вопрос является очень спорным, и подлежит дальнейшим исследованиям.

Выводы. В распределительных сетях коммунально-бытовых потребителей, содержащих преимущественно однофазную нагрузку, устройства компенсации реактивной мощности применяются крайне редко, но расход электроэнергии в жилом секторе увеличивается, поэтому рассмотрение установки устройств компенсации у таких абонентов становится актуальной темой.

Для нормальной работы любого объекта должно быть обеспечено бесперебойное снабжение его электроэнергией в необходимом количестве и надлежащего качества. То есть основные значения показателей качества электроэнергии: напряжение, броски напряжения, частота должны удовлетворять заданным требованиям.

Большое внимание должно уделяться вопросам: создания необходимой надежности электроснабжения, экономичности и удобства эксплуатации рассматриваемых схем электроснабжения.

Для повышения энергоэффективности необходимо снижать реактивную составляющую потребляемой электрической мощности посредством автоматического управления коэффициентом мощности.

Список литературы: **1.** Школа электрика [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://electricalschool.info. **2.** Официальный сайт компании «Элек.ру» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.elec.ru. **3.** *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1978. – 528 с. **4.** *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с. **5.** *Байда Л. И.* Электрические измерения / *Добротворский Н. С.*, *Душин Е. М.* и др. ; под ред. *А. В. Фремке* и *Е. М. Душина*. — 5-е изд., перераб., и доп. — Л. : Энергия, 1980. —392 с. **6.** *Матура Р.М.* Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 254 с.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

УДК 621.314.б

Р.С. ЛОЖКИН, ассистент, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ТОРОИДАЛЬНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА В НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

Представлена математическая модель для численного расчета процесса перемагничивания ферромагнитного тороидального сердечника в наносекундном диапазоне. Модель может быть использована для прогнозирования формы рабочего импульса тока в первичном витке индуктора и формы импульса ускоренного напряжения, генерируемого отдельным индуктором в секции линейного индукционного ускорителя, который работает в режиме нагрузки и без неё.

Представлено математичну модель для чисельного розрахунку процесу перемагнічування феромагнітного тороїдального сердечника в наносекундному диапазоні. Модель може бути застосована для прогнозування форми робочого імпульсу струму в первинному витку індуктора і форми імпульсу прискорювальної напруги, що генерує окремий індуктор в секції лінійного індукційного прискорювача, що працює в навантаженному або в ненавантаженному режимі.

There is submitted the mathematical model for numerical account of the magnetic reversal process of the ferromagnetic toroidal core in nanosecond range. The model can be used for the forecasting form of the working pulse of a current in the primary coil of inductor and the form of a pulse of the accelerating voltage, which is being generated from separate inductor in section of the linear induction accelerator which is working in loaded or in a non-loaded mode.

Создание сильноточных линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) зарядово-компенсированных ионных пучков [1, 2] перспективно с точки зрения энергетики будущего и многих других промышленных применений, использующих мощные ионные пучки. При проектировании секции, ускоряющей ионы в ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков, возникает необходимость в прогнозировании формы импульса ускоряющего напряжения, генерируемого отдельным индуктором в секции и тока в первичном витке индукторов. Это знание необходимо для формулирования требований, предъявляемых к источнику питания ускорителя, и также даёт возможность определить потери в ферромагнетике в течение ускоряющего импульса, что полезно для проведения теплового расчета секции.

Постановка проблемы. Особенностью работы секции, ускоряющей ионы в ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков, является то, что она может работать на холостом ходу. Это происходит, когда величины токов электронного и ионного пучка по модулю равны. В ускоряющем зазоре этой секции энергия отбирается от электронного

пучка (электроны тормозятся), а пучок ионов ускоряется. То есть происходит рекуперация энергии электронного пучка и передача её ионному пучку.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время довольно хорошо изучены вопросы формирования ускоряющего напряжения в секциях ЛИУ, нагруженных пучком (например [4, 5]). Вопросы же формирования ускоряющего напряжения в секциях ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков, работающих при полной токовой компенсации, ранее не рассматривались.

Цель и задачи исследований. Целью данной статьи является разработка математической модели, позволяющей рассчитать процесс импульсного перемагничивания ферромагнитных сердечников при заданных параметрах схемы и геометрии сердечника. При разработке источников питания ускорителя ионов одним из требований является малый разброс на столе импульса ускоряющего напряжения (не более 5 %), и как можно меньшие длины фронта и спада импульса (не более 20 % от общей длительности импульса). Исследование динамики перемагничивания сердечников полезно как для формулирования требований к источнику питания, которые позволят получить требуемую форму импульса ускоряющего напряжения, так и с точки зрения определения влияния геометрии сердечников на процесс их перемагничивания.

Описание модели. Для расчета процесса перемагничивания использовалось полуэмпирическое уравнение импульсного перемагничивания материалов с ППГ [3, 4, 5], учитывающее влияние вихревых токов и магнитной вязкости:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{H(t) - H_0}{\left[r_m \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right) \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot d^2}{8 B_r} \left(B + B_r \right)}, \qquad (1)$$

где $H(t)$ – функция напряженности поля в ферромагнитной ленте от времени, А/м; H_0 – поле старта, А/м; B – текущее значение индукции в ферромагнетике, Тл; B_r, B_s – остаточная индукция и индукция насыщения, Тл; r_m – динамическое сопротивление ферромагнетика, Ом/м; σ – удельная проводимость ферромагнетика, 1/(Ом·м); d – толщина ферромагнитной ленты, м.

Данное выражение применимо при $H(t) > H_0$ и выражает связь между скоростью изменения индукции и напряженностью поля в ферромагнитной ленте, которая до начала импульса находилась в отрицательном насыщении ($-B_r$). Поскольку напряженность поля в сердечнике является величиной, зависящей от радиуса – для численного

моделирования динамики перемагничивания сердечник разбивают на достаточное количество тонких слоёв с разными радиусами [4, 5] и учитывают напряженность поля и изменение индукции в каждом слое. При проведении численного расчета напряженность магнитного поля приближенно считают одинаковой по всему слою и равной $H_j(t) = i(t)/(2\pi r_j)$, где $i(t)$ – функция тока перемагничивания от времени; $r_j = r_1 + \Delta r \cdot (j-1) + \Delta r/2$ – средний радиус j-го слоя (j = 1, 2…n); $\Delta r = (r_2 - r_1)/n$ – радиальная толщина отдельного слоя; r_1, r_2 – внутренний и наружный радиусы ферромагнитного сердечника (рис. 1 (а)).

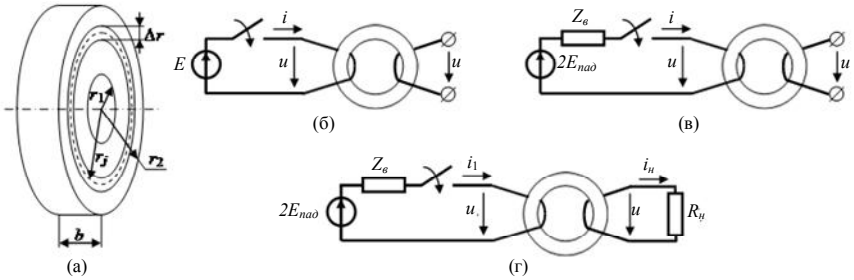


Рис. 1 – Размеры ферромагнитного сердечника (а) и схемы его включения (б, в, г)

Для численного решения выражения (1) представим его в конечно-разностной форме методом Эйлера [6]:

$$\frac{B_j(t_{k+1}) - B_j(t_k)}{\Delta t} = \frac{H_j(t_k) - H_0}{\left[r_m \left(1 - \frac{B_j^2(t_k)}{B_s^2} \right) \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot d^2}{8 B_r} \left(B_j(t_k) + B_r \right)}, \qquad (2)$$

здесь $t_k = k \cdot \Delta t$ (k = 0, 1, … n_t); Δt – временной шаг аппроксимации, с. Используя выражение (2) выразим падение напряжения на j-ом слое сердечника, обусловленное возникновением вокруг него вихревого электрического поля при его перемагничивании:

$$u_j(t_k) = S \cdot K_з \cdot \frac{B_j(t_{k+1}) - B_j(t_k)}{\Delta t} = i(t_k) \cdot R_j(t_k) - E_j(t_k), \qquad (3)$$

$$R_j(t_k) = \frac{S \cdot K_з}{2\pi r_j \left\{ \left[r_m \left(1 - \frac{B_j^2(t_k)}{B_s^2} \right) \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot d^2}{8B_r} \left(B_j(t_k) + B_r \right) \right\}}, \qquad (4)$$

$$E_j(t_k) = \frac{S \cdot K_з \cdot H_0}{\left[r_m \left(1 - \frac{B_j^2(t_k)}{B_s^2} \right) \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot d^2}{8B_r} \left(B_j(t_k) + B_r \right)}. \qquad (5)$$

В данных выражениях $S = b \cdot \Delta r$ – площадь поперечного сечения *j*-го слоя, $K_з$ – коэффициент заполнения сердечника ферромагнетиком. Выражения (3)…(5) показывают, что для любого момента времени падение напряжения в первичном витке, обусловленное перемагничиванием отдельного слоя сердечника, можно представить в виде падения напряжения на последовательной цепочке, состоящей из ЭДС $E_j(t_k)$ (направление которой совпадает с направлением тока $i(t_k)$) и сопротивления $R_j(t_k)$. Выражения (4) и (5) формальны и не имеют особого физического смысла. Их величины зависят от величины $B_j(t_k)$, которое для каждого последующего момента времени может быть рассчитано по формуле, выраженной из (3):

$$B_j(t_{k+1}) = B_j(t_k) + u_j(t_k) \cdot \Delta t / (S \cdot K_з). \qquad (6)$$

При проведении расчета для каждого момента времени определяют ток перемагничивания, падение напряжения на каждом участке сердечника, другие интересующие величины, токи и напряжения в цепи и значение индукции в каждом слое сердечника в следующий момент времени. В нулевой момент времени индукция в ферромагнетике во всех слоях сердечника задаётся равной $B_j(t_0) = -B_r$.

Результаты численного моделирования. В следующих пунктах представлены результаты расчета динамики перемагничивания сердечника, включенного в схемах, приведенных на рис. 1 (б), (в), (г), и использовавшиеся для этого дополнительные выражения. Во всех схемах расчет проводился для длительности импульса τ = 125 нс, в течение которого среднее по сечению ферромагнетика изменение индукции в сердечнике составляло $\Delta B = 2B_r$. В качестве ферромагнетика был взят сплав 50НП толщиной d = 10 мкм. Его параметры: H_0 = 100 А/м; B_r = 1,4 Тл; B_s = 1,5 Тл; r_m = 22 кОм/м; σ = 2,22 МСм/м. Были приняты

одинаковыми для всех сердечников следующие параметры: $K_з$ = 0,6; среднее за импульс напряжение на первичном витке сердечника $U_{ср} = 50$ кВ; поперечная площадь ферромагнитного сердечника $S_c = (U_{ср} \cdot \tau)/(\Delta B \cdot K_з) = 0{,}037$ м^2; средняя длина силовой линии $l_{ср} = 1$ м (средний радиус сердечников при этом составил $r_{ср} = l_{ср}/(2\pi) = 159$ мм, объем сердечников $V_c = S_c \cdot l_c = 0{,}037$ м^3).

В рассматриваемых схемах индуктивность рассеяния, паразитная емкость в первичном и во вторичном контурах и паразитная индуктивность соединительных проводников считались отсутствующими. Целью данных исследований было выявление общих закономерностей влияния геометрии сердечника и основных параметров питающей цепи на динамику его перемагничивания.

Для обеспечения малой погрешности численного расчета (на уровне 0,01 %), обусловленной кусочно-линейной аппроксимацией, каждая схема просчитывалась при различных значениях временного шага Δt и количества слоёв n. Величины Δt и n считались выбранными достаточными, если при уменьшении Δt в 2 раза или увеличении n в 2 раза результат расчета импульса тока перемагничивания изменялся не более чем на 0,01 %. Для всех моделей это условие выполнялось при Δt = $9{,}8 \cdot 10^{-12}$ с, n = 500.

1. Сердечник подключен к источнику постоянной ЭДС. Схема включения представлена на рис. 1 (б). Данная схема представляет собой идеализированный случай и полезна для определения вида импульса тока, который необходимо создать в первичном витке для обеспечения плоской вершины импульса ускоряющего напряжения в секции ЛИУ, ускоряющей скомпенсированный электронным ионный пучок. Расчет проводился при $E = U_{ср} = 50$ кВ для сердечников с разным отношением радиусов r_2 / r_1. Ширина сердечников при этом определялась по формуле $b = S_c/(r_2 - r_1)$. Ток в первичном витке определялся следующим образом:

$$i(t_k) = \left(E + \sum_{j=1}^{n} E_j(t_k) \right) \Big/ \left(\sum_{j=1}^{n} R_j(t_k) \right). \qquad (7)$$

Мгновенное значение удельной мощности потерь в ферромагнетике и удельная энергия потерь за импульс для каждого слоя были рассчитаны по следующим формулам:

$$p_{уд.j}(t_k) = u_j(t_k) \cdot i(t_k)/(S \cdot K_з \cdot 2\pi r_j), \qquad (8)$$

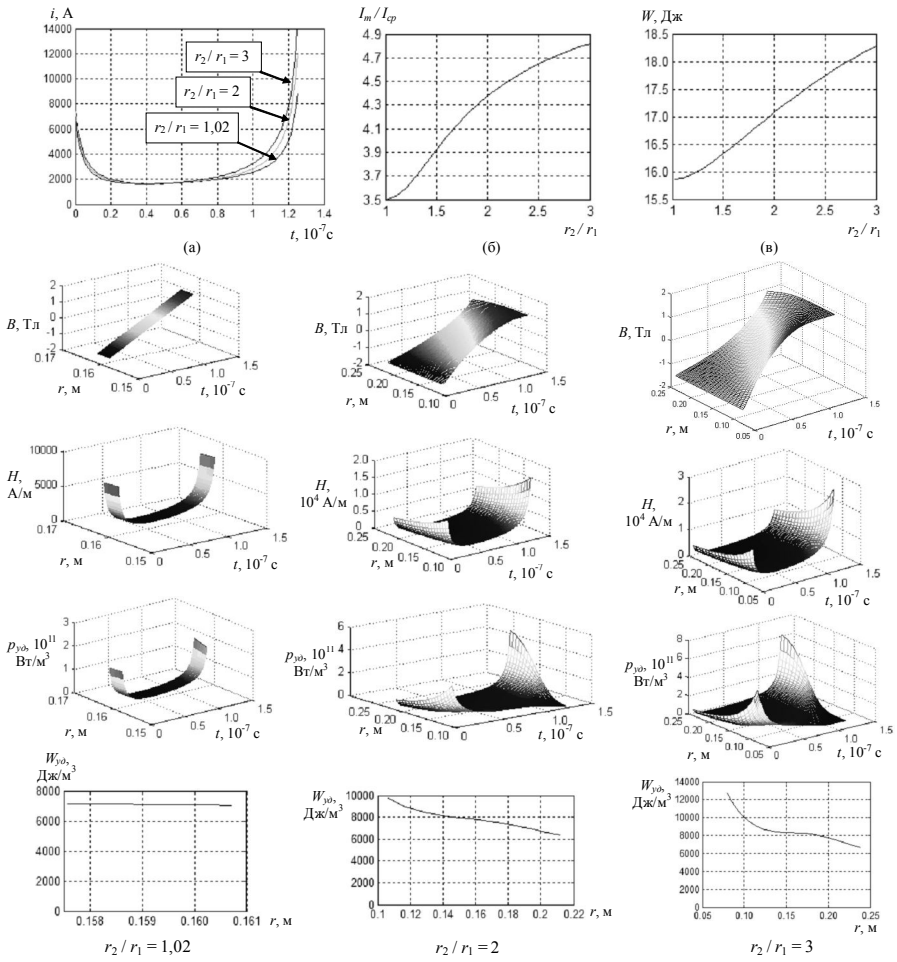


Рис. 2 – Результаты расчета динамики импульсного перемагничивания ферромагнит-ного тороидального сердечника при различных отношениях r_2 / r_1 (схема – рис. 1 (б))

$$W_{уд.j} = \sum_{k=0}^{n_t} p_{уд.j}(t_k) \cdot \Delta t \,, \qquad (9)$$

где $n_t = \tau / \Delta t$. Напряжение на индукторе в любой момент времени и полная энергия потерь в сердечнике за импульс были определены

следующим образом:

$$u(t_k) = \sum_{j=1}^{n} u_j(t_k) \,, \qquad (10)$$

$$W = \sum_{k=0}^{n_t} i(t_k) \cdot u(t_k) \cdot \Delta t \,. \qquad (11)$$

В результате расчета (рис. 2) была выявлена важная закономерность, что потери в сердечнике и отношение максимального тока к среднему за импульс будут тем меньшими, чем меньше отношение r_2 / r_1.

Следует отметить, что многие существующие аналитические расчеты потерь на перемагничивание учитывают только длину средней силовой линии сердечника и не чувствительны к отношению r_2 / r_1. Учет неоднородности распределения напряженности магнитного поля по радиусу позволяет точнее определить потери.

2. Сердечник подключен к длинной линии. Схема включения представлена на рис. 1 (в). Данная схема представляет собой интерес с точки зрения исследования возможности формирования импульса ускоряющего напряжения прямоугольной формы на индукторах, работающих в секции ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков. Параметры сердечника были заданы на основании расчета разрабатываемой конструкции [2]: $l_{ср} = 1$ м, $r_1 = 143$ мм, $r_2 = 175$ мм, $b = 12$ см.

Для питания индукторов секций, нагруженных током пучка, в настоящее время широко используются однородные формирующие линии (ОФЛ), подключаемые к индукторам посредством энергопроводов, имеющих волновое сопротивление $Z_в$ согласованное с эквивалентным сопротивлением нагруженного индуктора. При этом ОФЛ выдают в энергопровод прямоугольный импульс напряжения, который приходит на индуктор.

На рис. 3 (а) представлен результат расчета импульса тока и напряжения на индукторе при согласованном режиме его работы. Как видно из графика, форма импульса напряжения на индукторе в случае, когда он работает на холостом ходу, далека от прямоугольной. Приблизить форму к прямоугольной можно за счет уменьшения величины волнового сопротивления энергопровода $Z_в$ (рис. 3 (б)), однако это влечет за собой снижение КПД ОФЛ, что нежелательно. Лучшим способом обеспечения прямоугольности импульса является разработка источника питания, выдающего форму волны напряжения $E_{пит}(t)$, профилированную во времени таким образом, чтобы обеспечить форму

напряжения на индукторе, максимально близкую к прямоугольной (рис. 3 (в)).

При проведении расчетов использовались выражения (3)…(6), (10) и следующие:

$$i(t_k)=\left(2E_{пад}(t_k)+\sum_{j=1}^{n}E_j(t_k)\right)\Big/\left(Z_в+\sum_{j=1}^{n}R_j(t_k)\right); \qquad (12)$$

$$R_{экв}=\tau\cdot U_{ср}{}^2\big/W\,; \qquad (13)$$

$$W_{ист}=\sum_{k=0}^{n_t}(E_{пад}^2(t_k)/Z_в)\cdot\Delta t\;\; ; \qquad (14)$$

$$\eta=\left(W_{пер}/W_{ист}\right)\cdot 100\,\%\,. \qquad (15)$$

В данных выражениях W – потери на перемагничивание за импульс, взятые из графика, приведенного на рис. 2 (в); $W_{ист}$ – энергия, отданная в цепь за импульс источником питания; $W_{пер}$ – потери на перемагничивание за импульс при расчете исследуемой схемы (были определены по формуле (11)); η – КПД источника питания.

Для вариантов рис. 3 (а) и (б) величина падающей волны напряжения была задана одинаковой для всех моментов времени и равной:

$$E_{пад}(t_k)=U_{ср}\cdot\left(1+Z_в/R_{экв}\right)/2\,. \qquad (16)$$

Для получения плоской вершины напряжения на индукторе ($u(t_k)=U_{ср}$, рис. 3 (в)) величина $E_{пад}(t_k)$ для каждого момента времени задавалась следующим образом:

$$E_{пад}(t_k)=\left(U_{ср}+\sum_{j=1}^{n}E_j(t_k)\cdot Z_в\Big/\left(Z_в+\sum_{j=1}^{n}R_j(t_k)\right)\right)\Big/\left(2-2\cdot Z_в\Big/\left(Z_в+\sum_{j=1}^{n}R_j(t_k)\right)\right)$$

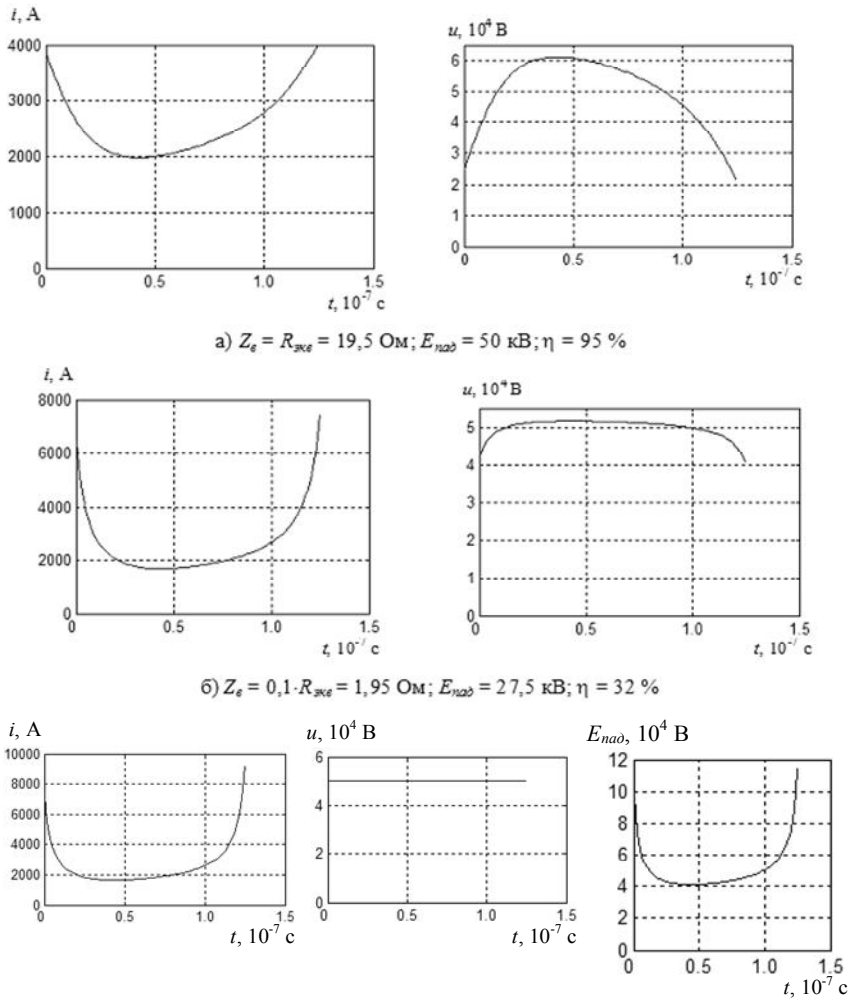


Рис. 3 – Результаты расчета формы импульса тока и напряжения на индукторе при различных величинах $Z_в$ и $E_{пад}(t)$ (схема – рис. 1 (в)): а – $Z_в=R_{экв}=19{,}5$ Ом; $\eta=95\,\%$, $E_{пад}$;=50 кВ; б – $Z_в=R_{экв}=1{,}95$ Ом; $\eta=32\,\%$, $E_{пад}$;=27,5 кВ; в – $Z_в=R_{экв}=19{,}5$ Ом; $\eta=93\,\%$

3. Сердечник подключен к длинной линии и нагружен активным сопротивлением. Схема включения представлена на рис. 1 (г). Данная схема представляет интерес с точки зрения исследования возможности формирования импульса ускоряющего напряжения прямоугольной формы индукторами, подключенными к ОФЛ через энергопроводы с согласованным волновым сопротивлением и работающими в секции ЛИУ, нагруженной инжектором заряженных частиц. Параметры сердечника для расчета были взяты исходя из требований к конструкции компенсатора [2]: $r_2 / r_1 = 2$ ($r_1 = 106$ мм, $r_2 = 212$ мм), $b = 35$ мм. Результат расчета представлен на рис. 4, из которого видно, что чем больше величина тока пучка – тем ближе форма импульса напряжения на нагрузке к прямоугольной. При расчете использовались выражения (3)…(6), (10), (13), (14) и следующие:

$$i_н(t_k) = \left(2E_{пад} - \left(\left(\left(Z_в + \sum_{j=1}^{n} R_j(t_k) \right) \Big/ \sum_{j=1}^{n} R_j(t_k) \right) - 1 \right) \cdot \sum_{j=1}^{n} E_j(t_k) \right) \Big/$$

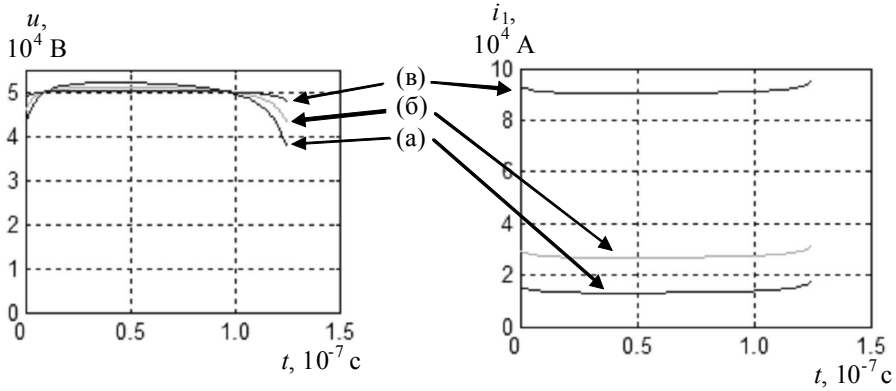
$$\Big/ \left(Z_в + R_н \left(Z_в + \sum_{j=1}^{n} R_j(t_k) \right) \Big/ \sum_{j=1}^{n} R_j(t_k) \right);$$

$$i(t_k) = \left(i_н(t_k) \cdot R_н + \sum_{j=1}^{n} E_j(t_k) \right) \Big/ \sum_{j=1}^{n} R_j(t_k);\ i_1(t_k) = i(t_k) + i_н(t_k);$$

$$W_н = \sum_{k=0}^{n_t} i_н(t_k) \cdot u(t_k) \cdot \Delta t;\ I_{нср} = \tau^{-1} \sum_{k=1}^{n_t} i_н(t_k) \cdot \Delta t;$$

$$\eta_{инд} = W_н / (W_н + W_{пер}) \cdot 100\ \%;\ \eta = (W_н + W_{пер}) / W_{ист} \cdot 100\ \%.$$

В данных выражениях $Z_в = \left(1/R_{экв} + 1/R_н\right)^{-1}$; $W_н$ – энергия, выделившаяся на нагрузке. Расчет был проведен для разных значений $R_н$ при $E_{пад} = U_{ср} = 50$ кВ.



а) $\eta_{инд} = 80\ \%$; $Z_в = 3{,}66$ Ом; $I_{н\,ср} = 10\,928$ А; $\eta = 99{,}7\ \%$

б) $\eta_{инд} = 90\ \%$; $Z_в = 1{,}83$ Ом; $I_{н\,ср} = 24\,588$ А; $\eta = 99{,}9\ \%$

в) $\eta_{инд} = 97\ \%$; $Z_в = 0{,}55$ Ом; $I_{н\,ср} = 88\,335$ А; $\eta = 100\ \%$

Рис. 4 – Результаты расчета формы импульса тока и напряжения на нагруженном индукторе, запитанном от ОФЛ (схема – рис. 1 (г))

Выводы. Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1) При неизменных площади поперечного сечения сердечника, длине его средней силовой линии и объеме ферромагнетика потери в сердечнике будут тем меньшими, чем меньше отношение его радиусов r_2 / r_1. Это обусловлено тем, что напряженность магнитного поля в сердечнике распределена по радиусу неоднородно и является наибольшей на внутреннем радиусе, из-за чего ферромагнетик, расположенный в слоях сердечника с меньшим радиусом, раньше входит в насыщение, по сравнению с ферромагнетиком, расположенным во внешних слоях, вследствие чего потери во внутренних слоях сердечника возрастают.

2) Для обеспечения наилучшей прямоугольности импульса ускоряющего напряжения в секции ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков её индукторы может быть целесообразно питать через согласованные энергопроводы от импульсного модулятора с особым образом профилированной во времени, непрямоугольной формой импульса выходного напряжения. Это обусловлено тем, что ток перемагничивания сердечников имеет сложную U-образную форму.

3) Чем больше КПД индукционной системы секции ЛИУ, нагруженной пучком и запитанной от согласованной ОФЛ – тем ближе к прямоугольной форме в ней импульс ускоряющего напряжения. Это обусловлено тем, что при расчете схемы на большую величину тока

пучка ток, потребляемый индуктором, становится по форме всё ближе к прямоугольной.

Для более точного определения формы импульса ускоряющего напряжения в секции и тока через индукторы и для выработки окончательных требований к источнику питания ЛИУ данную модель целесообразно дополнить паразитными параметрами (индуктивностями рассеяния, паразитными емкостями в первичном и во вторичном контурах ЛИУ и т. д.).

Список литературы: 1. *Карась В.И.* Исследования линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков для инерциального УТС / *В.И. Карась, В.И. Голота, В.А. Кияшко и др.* // Проблемы теоретической физики.– Киев.- 1991.– С. 165-180. **2.** *Гурин А.Г.* Элементы секции сильноточного линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков с повышенными энергетическими характеристиками / *А.Г. Гурин, Е.А. Корнилов, Р.С. Ложкин* // Problems of atomic science and technology.– 2010.– № 3.- Series: Nuclear Physics Investigations (54).- С. 61-66. **3.** *Пирогов А.И.* Магнитные сердечники в автоматике и вычислительной технике / *А.И. Пирогов, Ю.М. Шамаев*.- М.: «Энергия», 1967. **4.** *Матора И.М.* Теория формирования импульса неоднородной формирующей линией на произвольной нагрузке / *И.М. Матора, В.А. Савин* // Радиотехника и электроника. – 1976. – т. XXI. – вып. 9. - С. 1878-1886. **5.** *Кияшко В.А.* Формирование импульса тока и напряжения в линейных индукционных ускорителях / *В.А. Кияшко, Е.А. Корнилов, Ю.Е. Коляда* // Вопросы атомной науки и техники.- Харьков, ХФТИ АН УССР.- 1980.- Серия: Техника физического эксперимента.- Вып. 1(5).- С. 90-93. **6.** *Самарский А.А.* Численные методы: Учеб. пособие для вузов / *А.А. Самарский, А.В. Гулин*. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.– 432с.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

УДК 621.316

А. А. МИРОШНИК*,* канд. техн. наук; доц., ХНТУСГ, Харьков

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ СЕТЯХ

Проаналізовано питання енергозбереження та покращення якості електричної енергії в сільських мережах, зокрема проблема зниження несиметрії та несинусоїдальності струмів та напруг.

Проанализированы вопросы энергосбережения и улучшения качества электроэнергии в сельских сетях, в частности проблема снижения несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений.

Analyzed by energy conservation and improve the quality of electricity in rural networks, in particular the problem of reducing the asymmetry and nonsinusoidality currents and voltages.

Постановка проблемы. На современном этапе развития отечественной энергетики достаточно остро стоит вопрос перехода к энергосберегающим технологиям в сельскохозяйственном производстве, что обусловлено возрастающим электропотреблением и снижением качества электрической энергии развивающихся сельскохозяйственных потребителей.

Анализ последних исследований и публикаций. В соответствии с постановлением Кабинета Министров Украины от 05.02.97 №148 «Про комплексну державну програму енергозбереження України» и произошедшими в Украине изменениями экономических отношений возникла необходимость изменения подхода к энергопроизводству и энергопотреблению. На сегодняшний день энергосбережение является главным направлением энергетической политики Украины в новых экономических условиях.

Минимизация экономических затрат при электроснабжении сельского хозяйства - большая комплексная задача. С ней тесно связаны задачи повышения качества электроэнергии и надежности электроснабжения. При этом важное место занимают мероприятия по снижению потерь электроэнергии и рациональному её использованию.

Цель и задачи исследования. Детально проанализировать проблему повышения качества электрической энергии в сельских сетях.

Основной материал исследований. Электрическая энергия, поставляемая энергоснабжающими организациями потребителям по договорам, выступает как товар особого вида, характеризующийся совпадением во времени процессов производства, транспортирования и потребления, а также невозможностью его хранения и возврата. Соответственно, как к товару любого вида, к электроэнергии применимо

понятие «качество» [1]. Отклонение показателей качества электроэнергии от установленных стандартами ухудшают условия эксплуатации электроустановок как сети так и потребителей.

Показатели качества электроэнергии (ПКЭ) регламентируемые ГОСТ 13109-97 [2] могут быть условно разделены на три группы:

- к первой группе можно отнести отклонения частоты и отклонения напряжения, которые связаны с особенностями технологического процесса производства и передачи электроэнергии;

- ко второй группе можно отнести ПКЭ, характеризующие несинусоидальность формы кривой напряжения, несимметрию и колебания напряжения;

- к третьей группе можно отнести ПКЭ, характеризующие случайные электромагнитные явления и электротехнические процессы, неразрывно связанные с технологическим процессом производства, передачи и потребления электроэнергии.

Источниками искажений, относящимися ко второй группе, являются главным образом электроприемники (ЭП). Для обеспечения электромагнитной совместимости этих электропиемников с сетью необходимы соответствующие технические мероприятия как на этапе разработки и производства, так и в процессе эксплуатации.

К показателям ПКЭ третьей группы относятся провалы напряжения, перенапряжения и импульсы напряжения, которые возникают в системе электроснабжения в большинстве случаев в результате коммутаций электрооборудования или разрядов молнии на линию электропередачи.

Показатели качества электроэнергии первых двух групп нормируются ГОСТ 13109-97, и на них установлены два допустимых уровня: нормальный и предельный. ПКЭ третьей группы не нормируются, однако статистическая информация о них имеет большое значение для нормальной эксплуатации электроэнергетической системы.

Ниже приведены показатели качества электроэнергии, которые нормируются ГОСТ 13109-97:

- установившееся отклонение напряжения δU_y;

- размах изменения напряжения δU_t;

- доза фликера P_t;

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U;

- коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$;

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U};

- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U};

- отклонение частоты Δf;

- длительность провала напряжения Δt_n;

- импульсное напряжение $U_{èìï}$;

- коэффициент временного перенапряжения $K_{ïåðU}$;

При определении значений некоторых ПКЭ стандартом вводятся следующие вспомогательные параметры электрической энергии:

- интервал между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$;

- глубина провала напряжения δU_n;

- частота появления провалов напряжения $F_ï$;

- длительность импульса по уровню 0,5 его амплитуды $\Delta t_{èìï\ 0,5}$;

- длительность временного перенапряжения $\Delta t_{nåðU}$.

Для оценки соответствия ПКЭ указанным нормам (за исключением длительности провала напряжения, импульсного напряжения и коэффициента временного перенапряжения) стандартом устанавливается минимальный расчетный период, равный 24 ч.

В связи со случайным характером изменения электрических нагрузок требование соблюдения норм качества электроэнергии (КЭ) в течение всего этого времени практически нереально, поэтому в стандарте устанавливается вероятность превышения норм КЭ. Измеренные ПКЭ не должны выходить за нормально допустимые значения с вероятностью 0,95 за установленный стандартом расчетный период времени (это означает, что можно не считаться с отдельными превышениями нормируемых значений, если ожидаемая общая их продолжительность составит менее 5% за установленный период времени).

Другими словами, КЭ по измеренному показателю соответствует требованиям стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5% от установленного периода времени, т.е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени .

Рекомендуемая общая продолжительность измерений ПКЭ должна выбираться с учетом обязательного включения рабочих и выходных дней и составляет 7 суток.

Одними из основных и наиболее важных режимных параметров, определяющих качество электроэнергии, являются несимметрия и несинусоидальность напряжений и токов в трехфазных сетях, которые приводят к дополнительным отклонениям напряжения на зажимах потребителей, увеличению потерь, ухудшению условий работы электрооборудования и т. д. [3]

При этом необходимо исходить из того, что электрификация базируется на трех совершенно неразрывных самостоятельных процессах: производство, передача и потребление энергии. Ни один из этих процессов не может быть реализован без двух других. Поэтому вопросы соответствия показателей качества электроэнергии установленным нормам практически в равной степени затрагивают интересы и производителя и покупателя (потребителя) электроэнергии.

Понятие качества электрической энергии отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальных частоте, напряжении, токе и т.п., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое КЭ. Таким образом, качество электрической энергии определяется совокупностью ее характеристик, при которых электроприемники (ЭП) могут нормально работать и выполнять заложенные в них функции.

Качество электрической энергии в месте производства не гарантирует ее качества на месте потребления, поскольку до и после включения ЭП в точке его присоединения к электрической сети оно может быть различно.

КЭ тесно связано с надежностью электроснабжения, поскольку нормальным режимом электроснабжения потребителей является такой режим, при котором потребители получают электроэнергию бесперебойно, в количестве, заранее согласованном с энергоснабжающей организацией, и нормированного качества.

В промышленности качество электрической энергии оценивается по технико-экономическим показателям, учитывающим ущерб вследствие порчи материалов и оборудования, расстройства технологического процесса, ухудшения качества выпускаемой продукции, снижения производительности труда - так называемый технологический ущерб. Кроме того, существует и ущерб от некачественной электроэнергии, который характеризуется увеличением потерь электроэнергии, выходом из строя электротехнического оборудования, нарушением работы автоматики, телемеханики, связи, электронной техники и т.д.

Механизм управления качеством электроснабжения имеет свои специфические особенности [4]. Характер потребления электроэнергии в каждый момент времени является величиной вероятностной, поэтому энергоснабжающая организация оперирует, чаще всего, показателями потребности предыдущих временных периодов или ее математическим ожиданием. В роли плановых показателей качества выступают не разработанные в энергоснабжающей организации стандарты, а установленные на государственном уровне нормативные показатели, выполнение которых является обязательным для всех энергопредприятий, независимо от их мощности и территориального расположения.

Принципиальной особенностью проблемы повышения качества электроснабжения является ее межотраслевой характер. Качество электроснабжения у потребителя обеспечивается путем воздействия на параметры режима системы электроснабжения производителя и взаимосвязанной работой многих предприятий различных отраслей. Поэтому сравнение плановых и фактических показателей качества электроснабжения и разработка мероприятий по повышению качества являются обязанностью не только энергоснабжающей организации, но и потребителя в рамках требований, установленных Правилами пользования электроэнергии и прочими инструктивными материалами.

Поэтому анализ проблемы качества электрической энергии показывает, что необходима разработка новых методов, моделей, программных и технических средств, а также возникает необходимость переходить на более энергосберегающую систему электроснабжения, в которой отсутствовали бы несимметричные режимы, а потери электроэнергии были бы на порядок ниже.

Выводы. Таким образом, решение задач энергосбережения и улучшения качества электрической энергии в сельских сетях тесно связано с решением проблемы снижения несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений в этих сетях. Поэтому актуальным и своевременным является рассмотрение вопросов, связанных с разработкой методов и технических средств по борьбе с некачественной электрической энергии.

Список литературы: 1 Управление качеством продукции. Справочник. - М.: Издательство стандартов, 1985.- 464 с. **2.** ГОСТ 13109-97. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. **3.** *Наумов И. В.* Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств / *И. В. Наумов* // Дисс. докт. тех. наук, 05.20.02 – Иркутск, 2002. – 387 с. **4.** *Горюнов И. Т.* Проблемы обеспечения качества электрической энергии / *И. Т. Горюнов, В. С. Мозгалёв, В. А. Богданов* // Электрические станции. – 2001. – № 1. – с. 16-20.

Поступила в редколлегию 30.10.2011

УДК 621.315

С.А.РАССАМАКІНА , магістр, НТУ «ХПІ»,
А.Ю. ЧЕРНОКОЗОВ, магістр, НТУ «ХПІ»,
Г.В. БЕЗПРОЗВАННИХ, д.т.н., проф., НТУ «ХПІ»

ВПЛИВ НА ПЕРЕХІДНЕ ЗАГАСАННЯ ТЕЛЕФОННИХ КАБЕЛІВ ВАРИАЦІЙ ЧАСТКОВИХ ЄМНОСТЕЙ

Виконані розрахунки коефіцієнту асиметричності та електричної складової перехідного загасання при варіаціях часткових ємностей в телефонних кабелях для групових абонентських ліній. Показано, що для забезпечення якості цифрових сигналів, які передаються по кабелю, настройки технологічного обладнання повинні забезпечувати відхилення ємності відносно номінального значення не більше як на 1%.

Выполнены расчеты коэффициента ассиметричности и электрической составляющей переходного затухания при вариациях частичных емкостей в телефонных кабелях для групповых цифровых абонентских линий. Показано, что для обеспечения качества передаваемого цифрового сигнала настройки технологического оборудования должны обеспечивать отклонение рабочей емкости относительно номинальной не более чем на 1%.

Factor calculations unbalance and an electric component of transitive attenuation are executed at variations of partial capacities in telephone cables for group digital user's lines. It is shown, that for maintenance of quality of a transferred digital signal of adjustment of the process equipment should provide a deviation of working capacity concerning nominal no more than on 1 %.

Розвиток інтелектуальних інформаційних мереж абонентського доступу йде в напрямку розширення спектру інформації: від аналогової телефонії через Internet до цифрового відео по запиту . Для забезпечення передачі широкосмугових цифрових сигналів необхідна відповідна кабельна інфраструктура. Розширення та модернізація мереж абонентського доступу ведеться в напрямку використання магістральних волоконно-оптичних кабелів та сучасних симетричних телефонних кабелів для групових цифрових абонентських ліній.

Підвищення швидкості передачі цифрових сигналів в абонентській мережі обумовлює жорсткі вимоги до електричних параметрів телефонних кабелів. А це, в свою чергу, зобов'язує виробників кабельної продукції впроваджувати «високі» технології при виготовленні кабелів для сучасних цифрових мереж, в тому числі і абонентського доступу [1 – 2].

Для симетричної (збалансованої) пари принципово важлива властивість симетричності, тобто однакові фізичні та електричні властивості прямого та зворотного провідників. В іншому випадку значно зростають струми та напруги перешкод, що виникають в ланцюзі. Суть симетричності полягає в тому, що струми та напруги, які наводяться, мають практично однакові амплітуди та протилежні фази, тобто компенсують один одне. Ряд важливих параметрів симетричних кабелів

пов'язано з механізмом взаємних впливів між парами. Перехідні перешкоди є основним джерелом шумів, які знижують якість передачі сигналів в мережах на симетричних кабелях. Актуальність цієї задачі постійно зростає, адже перехідні перешкоди зростають зі збільшенням частоти, тобто при забезпеченні нових видів послуг в абонентській мережі.

Ціль статті: аналіз впливу на перехідне загасання розкиду часткових ємностей між сусідніми симетричними парами в кабелі з однією четвіркою.

На рис.1 показано міст часткових ємностей (рис.1): 1, 2 ,3, 4 – ізольовані провідники, між якими утворюється чотири часткові ємності: C_{12}, C_{14}, C_{24}, C_{23} . В такій конструкції дві робочі симетричні пари: 1, 2 – перша; 3,4 – друга пара відповідно. В разі ідеальної конструкції часткові ємності однакові (рис.2): напруженості електричного поля повністю ідентичні відповідно до поданих потенціалів на жили пар: +50 В на жили 1,3; та –50 В – на жили 2,4. Коефіцієнт ємнісного зв'язку в такій конструкції дорівнює нулю.

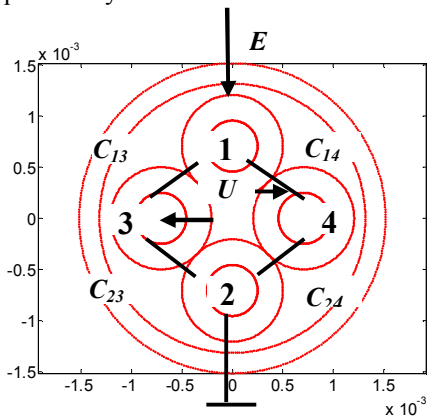


Рис. 1 – Міст часткових ємностей одночетвіркового симетричного кабелю

При подачі напруги ***E*** на пари напруга перешкоди ***U*** в діагоналі моста відсутня (рис.1), тобто відсутні взаємні перешкоди між парами.

Відхилення в діаметрах провідників, товщині ізоляції, кроків скрутки від номінальних значень призводить до появи асиметричності в електричних ємностях K_1:

$$K_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23}) \quad . \qquad (1)$$

В результаті в діагоналі мосту виникає напруга перешкоди ***U***:

$$U = E \frac{C_{13} \cdot C_{24} - C_{14} \cdot C_{23}}{(C_{13} + C_{24}) \cdot (C_{14} + C_{24})} \quad , \qquad (2)$$

або в логарифмічних одиницях виміру:

$$U_d = 20 \lg \frac{E}{U}, dB \qquad (3)$$

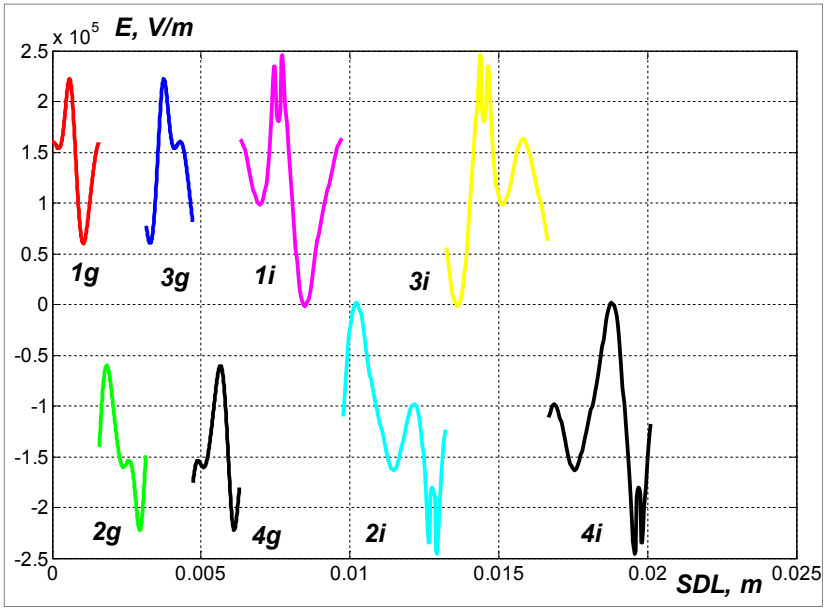


Рис. 2 – Розгортка напруженості електричного поля по поверхням струмопровідних жил (1g, 2g, 3g, g), ізоляції (1i, 2i 3i, 4i) для одночетвіркового кабелю ідеальної конструкції в металевому екрані

Розрахунки за формулами (1), (2) та (3) виконано для двох випадків варіацій часткових ємностей від номінальних значень C_n: перший – при адитивному:

$$C = C_n \cdot \tilde{e},$$

другий – при мультиплікативному характері їх зміни :

$$C = C_n \cdot (1 + \tilde{e}),$$

де $\tilde{e}$ – випадкове число з нормальним законом розподілення.

На рис. 3 – 7 наведено результати розрахунків для симетричного одночетвіркового кабелю (діаметр провідника 0,5 мм, товщина поліетиленової ізоляції 0,25 мм). Номінальні значення часткових електричних ємностей становлять 100 пФ при погонних значеннях 16 пФ/м, тобто довжина кабелю дорівнює 6,25 метри.

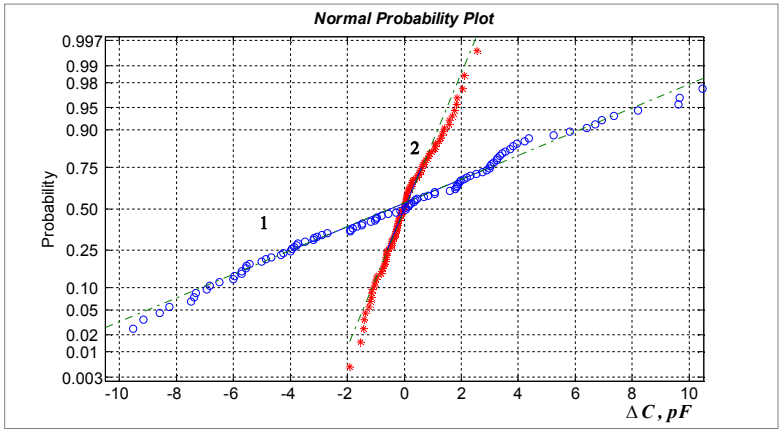


Рис. 3 – Інтегральні функції розподілу відхилень ємностей від номінальних значень у випадку адитивного характеру варіацій часткових ємностей

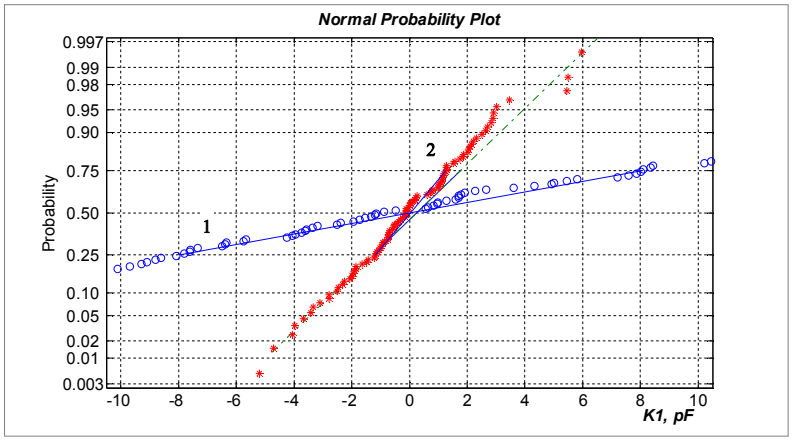


Рис. 4 – Інтегральні функції розподілу ємнісної асиметрії K_1 у випадку адитивного характеру варіацій часткових ємностей

Коефіцієнт варіації часткових ємностей у випадку адитивного характеру (рис. 3 – 5) становить σ/C = 5% (крива 1) та 1 % (крива 2) відповідно. Коефіцієнт варіації часткових ємностей у випадку мультиплікативного характеру (рис.6) становить σ/C = 0,1% (крива 1) та 0,01 % (крива 2) відповідно.

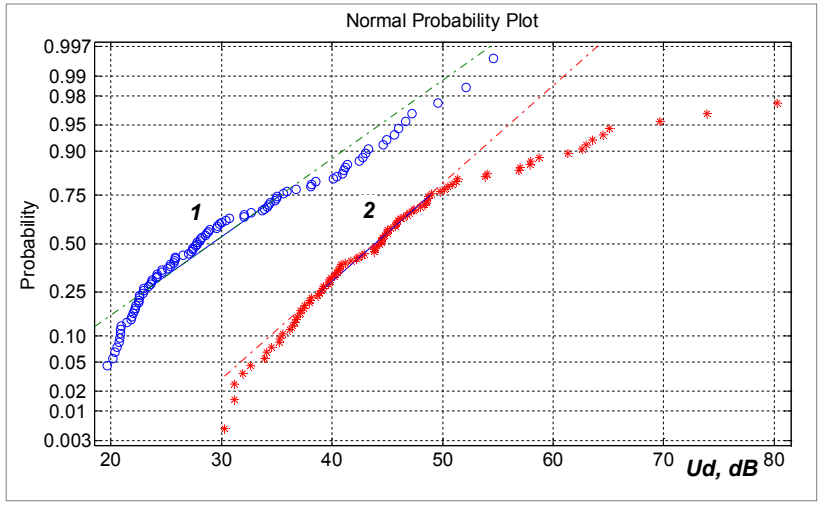


Рис. 5 – Інтегральні функції розподілу перехідного загасання U_d між сусідніми парами у випадку адитивного характеру варіацій часткових ємностей

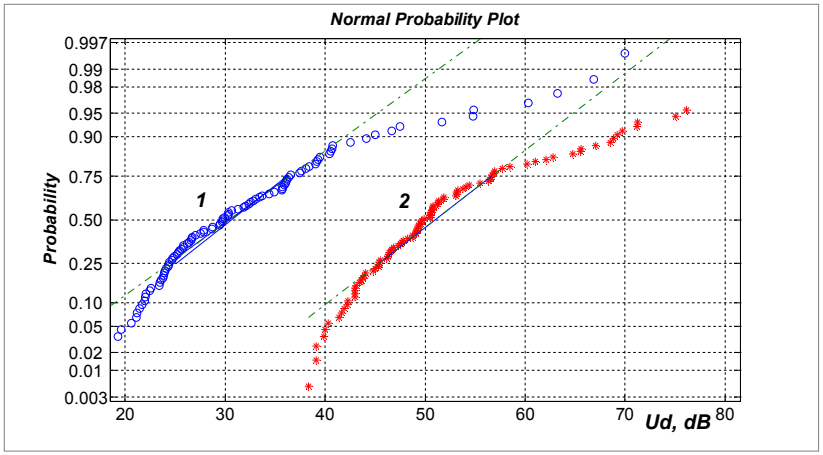


Рис. 6 – Інтегральні функції розподілу перехідного загасання U_d між сусідніми парами у випадку мультиплікативного характеру варіацій часткових ємностей

Таким чином, варіації часткових ємностей суттєво впливають на перехідне загасання між сусідніми парами.

При адитивному характері зміни стандартне відхилення U_d дорівнює 10,6 дБ (ΔC=4,9% ,σ/C = 5%) та 11,7 дБ (ΔC= 0,92% , σ/C = 1%) відповідно. Рівні напруги перешкоди між сусідніми парами становлять 45 дБ (ΔC= 0,92%) та 27 дБ (ΔC=4,9%) на рівні 50% вірогідності відповідно.

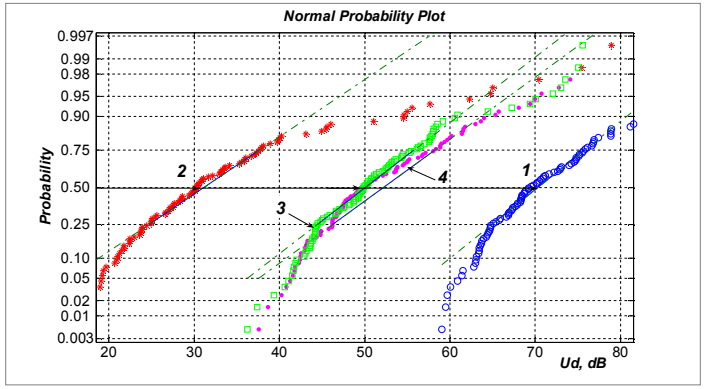


Рис.7 – Інтегральні функції розподілу перехідного загасання U_d між сусідніми парами у випадку адитивного (криві 1,3) та мультиплікативного (криві 2, 4) характеру варіацій часткових ємностей:
1, 2 – σ/C = 0,1%; 3 – σ/C = 1%; *4* – σ/C = 0,01%

При однакових коефіцієнтах варіації σ/C = 0,1% розкид часткових ємностей становить 0,101% та 10,1% у випадку адитивного (крива 1) та мультиплікативного (крива 2) характеру їх зміни (рис.7) відповідно. В результаті перехідне загасання в 2, 33 рази менше, тобто рівень взаємних впливів між сусідніми парами більше (рис.7, криві 1 та 2 на рівні 50% вірогідності) при мультиплікативному характері варіацій часткових ємностей.

Характер зміни варіацій часткових ємностей практично не впливає на перехідне загасання при їх однакових значеннях: ΔC= 0,92%, криві 3 та 4 рис.7.

Значення перехідного загасання, яке дорівнює 27 – 30 дБ, мають симетричні абонентські дроти для передачі аналогових телефонних сигналів в спектрі тональних частот. Виходячи з цього, настройки технологічного обладнання повинні забезпечувати відхилення часткових ємностей симетричних кабелів для передачі цифрових сигналів в абонентській телефонній мережі не більше як на 1% від номінальних значень.

Список літератури: **1**. *Кох Д.* Эволюция и конвергенция в электросвязи/ *Д. Кох*, Я. Яновский – М.: Радио и связь, 2001. **2.** *Бычков В.В.* Широкополосные линии связи в России в ближайшей перспективе глазами кабельщиков / *В.В. Бычков, Ю.Д.Дмитриев, Д.В. Хвостов*// Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2007. – №2.

Надійшла в редколегію 06.10.2011

УДК 621. 314

Н.В. РУДЕВИЧ**,** канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ

В статье рассмотрено влияние несинусоидальности сигналов тока на погрешности измерительного трансформатора тока.

В статті розглянуто вплив несинусоїдальності сигналів струму на похибки вимірювальних трансформаторів струму.

In article influence of unharmonicity signal of a current on an errors of the measuring transformer of a current is considered.

Постановка проблемы. С ростом нелинейных потребителей в энергосистемах уровень высших гармоник в сигналах тока и напряжения постоянно увеличивается. Для решения множества задач, например определения показателей качества электроэнергии, необходимо измерять величины гармонических составляющих тока, напряжения, мощности в сигналах промышленной частоты. Точность таких измерений, как и для основной частоты, зависит от точности измерительных трансформаторов и средств измерения. В связи с этим к высоковольтным измерительным трансформаторам тока и напряжения выдвигаются новые требования, а именно необходимость ими обеспечить высокую точности преобразования гармонических составляющих сигналов тока и напряжения.

Анализ последних исследований и публикаций. При работе измерительного трансформатора тока (ТТ) в определенном классе точности нормируется его предельная токовая и угловая погрешности. При синусоидальном первичном токе классические выражения для определения погрешностей ТТ, зависящих от параметров трансформатора, имеют вид [1]

$$f_i = \frac{0.225 I_2 Z_2 l_M}{\sqrt{2}\mu_a S_M f W_{2н} F_1}\sin(\Psi+\varphi)100\,, \qquad (1)$$

$$\delta_i = \frac{0.225 I_2 Z_2 l_M}{\sqrt{2}\mu_a S_M f W_{2н} F_1}\cos(\Psi+\varphi)100\,, \qquad (2)$$

где f_i - относительная токовая погрешность (действующее значение тока) ТТ, δ_i - угловая погрешность ТТ, I_2 – действующее значение вторичного тока ТТ, Z_2 – модуль полного сопротивления вторичной цепи ТТ, l_M – средняя длина силовой линии магнитного поля в сердечнике ТТ, μ_a – абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитного материала сердечника ТТ, S_M – поперечное сечение сердечника ТТ, $W_{2н}$ – число витков вторичной обмотки ТТ, F_1 – первичная магнитодвижущаяся сила намагничивания ТТ, ψ - угол потерь, φ - фазовый сдвиг между вторичной ЭДС и вторичным током ТТ.

В работе [2] предложены выражения для определения токовой и угловой погрешностей ТТ при несинусоидальном первичном токе, которые без учета несимметрии тока имеют вид

$$f_i^{/} = 100[\frac{0.225 I_2 Z_2 l_M}{\sqrt{2}\mu_a S_M f W_{2н} F_1}\sin(\Psi+\varphi)+$$

$$+\sum_{n=2}^{40}\frac{0.225 I_2 k_{In}\sqrt{r_2^2 n + x^2 n^2}\, l_M}{\sqrt{2}\mu_a S_M f W_{2н} F_1}\sin(\Psi_n+\varphi_n)]\,, \qquad (3)$$

$$\delta_i^{/} = 100[\frac{0.225 I_2 Z_2 l_M}{\sqrt{2}\mu_a S_M f W_{2н} F_1}\sin(\Psi+\varphi)+$$

$$+\sum_{n=2}^{40}\frac{0.225 I_2 k_{In}\sqrt{r_2^2 n + x^2 n^2}\, l_M}{\sqrt{2}\mu_a S_M f W_{2н} F_1}\sin(\Psi_n+\varphi_n)]\,, \qquad (4)$$

где n – номер гармоники, k_{In} –коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, отн. ед.

Выражения (3-4) получены используя формулы (1-2) при условии разложения действующего значения вторичного тока в гармонический ряд, приняв число наиболее значимых высших гармоник 40

$$I_2 = \sum_{n=1}^{40} I_{2n}\,,$$

с учетом изменения активного и индуктивного сопротивлений вторичной цепи для высших гармоник

$$\underline{Z_{2n}} = \sqrt{r_{2n}^2 + x_{2n}^2}\, e^{j\varphi_n} = \sqrt{r_2^2 n + x_2^2 n^2}\, e^{j\varphi_n}\,,$$

где r_2 – активное сопротивление вторичной цепи ТТ на основной частоте, x_2 – индуктивное сопротивление вторичной цепи ТТ на основной частоте, φ_n - фазовый сдвиг между вторичной ЭДС и вторичным током ТТ n-ой гармоники, $\varphi_n = arctg\frac{x_{2n}}{r_{2n}}$.

Как можно видеть из выражений (3-4), токовая и угловая погрешности ТТ при несинусоидальном сигнале тока представляют собой сумму погрешностей ТТ для каждой отдельной гармоники.

Цель статьи. Установить влияние несинусоидальности сигналов тока на погрешности измерительных трансформаторов тока.

Основные материалы исследований. Классические выражения для определения погрешностей ТТ (1-2) выведены в предположении синусоидальности первичного тока любой частоты (50, 100, 150,....Гц) и синусоидальности тока намагничивания. Разложение несинусоидального первичного тока в гармонический ряд и нахождение погрешности ТТ, как суммы погрешностей ТТ для разных гармоник не будет соответствовать действительной погрешности ТТ. Трансформатор тока является нелинейным устройством и поэтому принцип суперпозиции при рассмотрении процессов в нем применять нельзя. Сердечник трансформатора не может одновременно намагничиваться токами различной частоты.

Как известно, погрешность в измерительном трансформаторе обусловлена наличием тока намагничивания i_μ. На основании первого закона Кирхгофа и схемы замещения ТТ (рис.1) выражение для мгновенного значения вторичного тока i_2 запишется как

$$i_2 = i_1^{/} - i_\mu , \qquad (5)$$

где $i_1^{/}$ -приведенный ко вторичной обмотке первичный ток ТТ, $i_1^{/} = \dfrac{i_1 W_{1н}}{W_{2н}}$

($W_{1н}$ - число витков первичной обмотки ТТ).

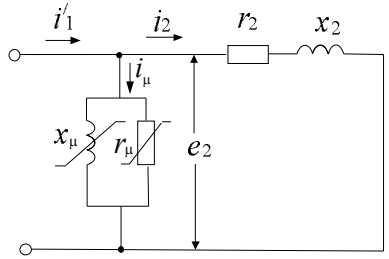


Рис. 1 – Схема замещения ТТ

Значение тока намагничивания зависит от индуктивного X_μ и активного r_μ сопротивлений ветви намагничивания, а также от величины электродвижущей силы (ЭДС) e_2, прикладываемой к ветви намагничивания. ЭДС e_2 равняется падению напряжения на активном r_2 и

индуктивном X_2 сопротивлении вторичной цепи (сопротивление обмотки +сопротивление нагрузки) ТТ от протекания тока i_2. Значения сопротивлений ветви намагничивания зависят от параметров семейства петель гистерезиса, представляющих зависимость $B = f(H)$ (B – индукция в сердечнике, H – напряженность магнитного поля в сердечнике) и являющихся основными характеристиками ферромагнитного материала середечника (рис2).

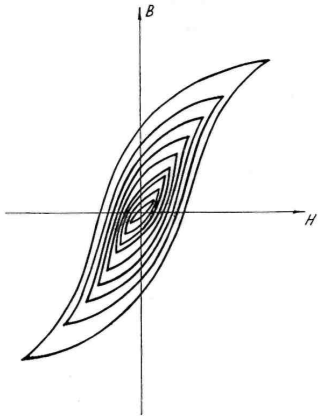


Рис. 2– Семейство петель гистерезиса

Величина индукции в сердечнике зависит от величины ЭДС e_2, и при неизменности ее амплитуды перемагничивание будет осуществляться по одной петле (рис.3).

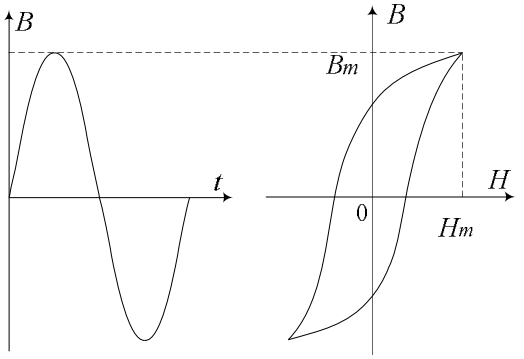


Рис. 3 – Связь зависимостей $B = f(t)$ и $B = f(H)$

Откуда тока намагничивания определится как

$$i_{\mu} = \frac{Hl_M}{W_{2н}} . \qquad (6)$$

Зависимость $B = f(H)$ имеет нелинейный характер, что приводит к нелинейности тока намагничивания и даже при синусоидальном первичном токе индукция в сердечнике будет несинусоидальной из-за несинусоидальности вторичного тока. Как правило, уровень высших гармоник в сигнале тока намагничивания мал и поэтому его несинусоидальностью пренебрегают. Откуда считают, что вторичный ток и, следовательно, индукция в сердечнике синусоидальны, что дает возможность использовать выражения (1-2) для определения погрешностей измерительных трансформаторов тока.

При несинусоидальном первичном токе сердечник ТТ будет также перемагничиваться по одной петле гистерезиса (при условии неизменности амплитуды тока основной частоты), а восходящий и нисходящий участки кривой петли будут несколько искажены вследствие присутствия высших гармоник в сигнале токе. В таком случае ток намагничивания будет иметь высшие гармоники, обусловленные не только нелинейностью сердечника, но и несинусоидальностью первичного тока.

Предположим, что измеряемый первичный ток содержит высшие гармоники, откуда запишем в общем виде выражение для вторичного тока

$$i_2 = I_{21m} \sin \omega t + \sum_{n=2}^{40} I_{2nm} \sin(n\omega t + \alpha_n) , \qquad (7)$$

где α_n – угол сдвига между первой и n-ой гармониками вторичного тока.

ЭДС, приложенная к концам ветви намагничивания

$$e_2 = (r_{21} i_{21} + \frac{x_{21}}{\omega} \frac{di_{21}}{dt}) + \sum_{n=2}^{40} (r_{2n} i_{2n} + \frac{x_{2n}}{n\omega} \frac{di_{2n}}{dt}) , \qquad (8)$$

с учетом того, что

$$\underline{Z_{2n}} = Z_{2n} e^{j\varphi_n} = r_{2n} + jx_{2n}$$

выражение (8) в общем виде перепишем

$$e_2 = E_{21m} \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{40} E_{2nm} \sin(n\omega t + \alpha_n + \varphi_n) . \qquad (9)$$

На основании закона электромагнитной индукции $e_2 = -W_2 S \frac{dB}{dt}$ индукция в сердечнике определится из следующего выражения

$$B = -\frac{1}{W_2 S} \int [E_{21m} \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{40} E_{2nm} \sin(n\omega t + \alpha_n + \varphi_n)] dt . \qquad (10)$$

После преобразования выражения (10) в общем виде получим

$$B = B_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1 + 90^{\circ}) + \sum_{n=2}^{40} B_{nm} \sin(n\omega t + \alpha_n + \varphi_n + 90^{\circ}) . \qquad (11)$$

Из выражения (11) видно, что индукция в сердечнике будет несинусоидальной, опережая вторичную ЭДС на 90°.

Очевидно, что напряженность магнитного поля будет функцией несинусоидальной, обусловленной нелинейностью сердечника и несинусоидальностью магнитного потока. В свою очередь, ток намагничивания трансформатора i_{μ} будет иметь также несинусоидальный характер и в общем виде выразится

$$i_{\mu} = I_{\mu 1m} \sin(\omega t + \varphi_1 + 90^0 + \Psi_1) + \sum_{n=2}^{N} I'_{\mu 1m} \sin(n\omega t + \phi_1 + 90^0 + \Psi'_n)$$

$$+ \sum_{n=2}^{40} I''_{\mu nm} \sin(n\omega t + \alpha_n + \varphi_n + 90^{\circ} + \Psi''_n) , \qquad (12)$$

где N – число гармоник, обусловленных нелинейностью сердечника,

ψ – фазовый сдвиг между магнитной индукции и током намагничивания (угол потерь),

i'_{μ}, i''_{μ} – составляющие тока намагничивания, обусловленные нелинейностью сердечника и несинусоидальностью измеряемого тока соответственно.

Выражение для первичного измеряемого тока в общем виде запишется

$$i_1 = I_{11m} \sin(\omega t + \delta_1) + \sum_{n=2}^{40} I_{1nm} \sin(n\omega t + \alpha_n + \delta_n) . \qquad (13)$$

Из выражения (5) с учетом (7,12,13) видно, что фазовый сдвиг каждой гармоники первичного тока по отношению к вторичному δ_n, а также амплитудная погрешность в частности будут зависеть от:

1) угла φ, зависящего от характера сопротивления вторичной цепи ТТ;

2) угла потерь ψ, зависящего от потерь на намагничивание (наклон петли) и гистерезис (площадь петли).

Выводы. Фазовый сдвиг между первичным и вторичным током ТТ будет характерен для каждой гармоники сигнала, поэтому при несинусоидальном первичном токе корректней говорить об угловой

погрешности ТТ каждой гармоники. Сумма фазовых сдвигов каждой гармоники первичного и вторичного токов не будет равна фазовому сдвигу между этими сигналами, как это получено в выражении (4). Связь между фазовыми сдвигами гармоник первичного и вторичного токов с фазовым сдвигом между этими сигналами будет намного сложнее, так как фазовый сдвиг суммы двух синусоидальных сигналов разной частоты не равен сумме фазовых сдвигов этих сигналов.

Сумма токовых погрешностей каждой гармоники сигнала первичного тока не будет равна токовой погрешности трансформатора тока при несинусоидальном первичном токе, как это получено в выражении (3). Вторичный ток может содержать гармоники, которых нет в первичном токе вследствие нелинейности сердечника, что соответственно отразится на его действующем значении.

И наконец, выражения (1) и (2) не могут быть распространены на вычисление соответствующих погрешностей ТТ для высших гармоник тока, так как трансформатор перемагничивается только по одной петле гистерезиса, обусловленной основной гармоникой сигнала (при условии неизменности ее амплитуды). Эти выражения будут справедливы для высших гармоник только в случае, когда трансформатор намагничивается синусоидальным током одной (любой) частоты. Подтверждением данного утверждения являются проведенные экспериментальные исследования, приведенные в работе [3].

Получение выражений для определения погрешностей ТТ при несинусоидальных входных сигналах требует создание математической модели ферромагнитного материала сердечника при таких условиях.

Список литературы. **1.** Трансформаторы тока / под ред. *В.В.Афанасьева*. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. **2.** *Савина Н.В*. Влияние качества электроэнергии на погрешность измерительных трансформаторов тока и напряжения / *Н.В. Савина, М.А. Сухомесов* // Электричество. – №11. – 2008. – С.6-11. **3.** *Cataliotti A. A* novel approach to current transformer characterization in the presence of harmonic distortion / *A. Cataliotti, D. Cara, A. Emanuel, S. Nuccio* // IEEE Transactions on Instrumentation and measurement. – No.5. – Vol.58. –2009. – P.1446–1450.

Поступила в редколлегию 30.09.2011.

УДК 621.3

Ю.А. СИРОТИН, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХПРОВОДНОЙ СХЕМЕ

Для трипровідною схеми запропонований метод ортогонального розкладання синусоїдального струму на енергетичні компоненти,яки пов'язані з активною, реактивної і розбалансованою потужністю. Наведені приклади показують, що навіть при симетричному напрузі поняття збалансованого і симетричного навантаження не тотожні. Це підтверджує його цінність для аналізу схем і синтезу компенсаторів з необхідними енергетичними властивостями

Для трехпроводной схемы предложен метод ортогонального разложения синусоидального тока на энергетические компоненты, которые связаны с активной, реактивной и разбалансированной мощностью. Приведенные примеры показывают, что даже при симметричном напряжении понятие сбалансированной и симметричной нагрузки не тождественны. Это подтверждает его ценность для анализа схем и синтеза компенсаторов с необходимыми энергетическими свойствами.

For three-wire circuits proposed the method of orthogonal decomposition of current on the energy component associated with the active, reactive and unbalanced power. Given examples show that even under a symmetrical voltage notion of balance and symmetrical load is not identical. This confirms its usefulness for circuit analysis and synthesis of compensators with the required energy properties

Мгновенная мощность (ММ), поставляемой энергии в нагрузку, подключенную по трехпроводной схеме (трехпроводную нагрузку), не зависит от выбора точки отсчета фазных напряжений (инвариантна). Это позволяет выбрать точку отсчета (искусственную точку заземления [1,2]) так, чтобы трехфазное напряжение не содержало последовательности нулевой составляющей (например, центр симметричной звезды, параллельно подключенной к рассматриваемой нагрузке). При синусоидальных токах и напряжениях все энергетические процессы полностью определены векторами комплексных действующих величин (*д.в.*) трехфазного мгновенного тока и напряжения. Так как эти токи и напряжения не содержат нулевой составляющей, то их вектора комплексных *д.в* содержатся в одном и том же двумерном подпространстве [3]. Это позволяет для описания энергетических процессов применить геометрические понятия векторных пространств (скалярное и векторное произведение, коллинеарность, проекцию одного вектора на другой вектор, понятие базиса и т.д.) [4].

В статье выполнен математический анализ энергетических процессов в месте подключения трехпроводной линейной нагрузки к сети с

несимметричным синусоидальным напряжением. Показано как из полного трехфазного тока выделить ортогональные трехфазные компоненты тока, имеющие однозначный энергетический смысл (связанный с активной, реактивной и несбалансированной мощностью) и получить уравнение мощности. Анализ выполнен в фазных и симметричных координатах. Симметричные координаты вводятся с помощью ортогонального базиса, что позволяет получить матрицы модифицированного преобразования Фортескью [3]. Такие матрицы сохраняют скалярное произведение (длины и углы), все мощности инвариантны относительно таких преобразований. Полученные соотношения конкретизированы для нагрузки типа треугольник. Приведены примеры

Энергетические процессы в трёхпроводном сечении $<a,b,c>$**.** В точке подключения 3-проводной нагрузки к распределительной сети с несимметричным напряжением в трёхпроводном сечении $<a,b,c>$

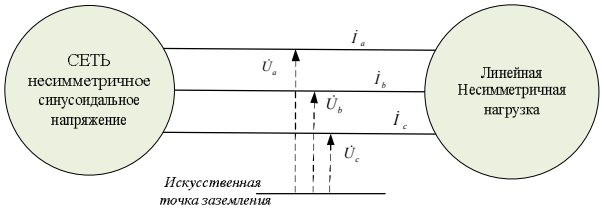


Рис. 1 – Трехфазная трехпроводная система

с синусоидальными процессами, мгновенные значения напряжения и тока

$$\boldsymbol{u}(t)=(u_a(t),u_b(t),u_c(t))^{\top}=\sqrt{2}\Re e[\boldsymbol{U}e^{j\omega t}], \tag{1}$$

$$\boldsymbol{i}(t)=(i_a(t),i_b(t),i_c(t))^{\top}=\sqrt{2}\Re e[\boldsymbol{I}e^{j\omega t}] \tag{2}$$

однозначно определены трехмерными *комплексными* векторами (3D-комплексами):

$$\boldsymbol{U}=\left[\dot{U}_a,\dot{U}_b,\dot{U}_c\right]^{\top}=\left[U_a e^{j\psi_a},U_b e^{j\psi_b},U_c e^{j\psi_c}\right]^{\top}, \tag{3.а}$$

$$\boldsymbol{I}=\left[\dot{I}_a,\dot{I}_b,\dot{I}_c\right]^{\top}=\left[I_a e^{j\varphi_a},I_b e^{j\varphi_b},I_c e^{j\varphi_c}\right]^{\top} \tag{3.б}$$

– *комплексными* действующими величинами (*д.в.*) напряжения и тока (фазорами).

$$\boldsymbol{U}=\frac{\sqrt{2}}{T}\int_0^T\boldsymbol{u}(t)e^{-j\omega t}dt\,,\qquad \boldsymbol{I}=\frac{\sqrt{2}}{T}\int_0^T\boldsymbol{i}(t)e^{-j\omega t}dt\,, \tag{4}$$

где $\top$ – знак транспонирования, T – период ($T\omega=2\pi$).

Для трехпроводной линейной нагрузки линейные токи (2) не содержат составляющую нулевой последовательности (первый закон Кирхгофа) и, следовательно, вектор линейных токов (3.б) ортогонален орту $\boldsymbol{e_0}=(1,1,1)/\sqrt{3}$ нулевой последовательности

$$(\boldsymbol{I},\boldsymbol{e}_0)=\boldsymbol{I}^{\top}\boldsymbol{e}_0=\frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c)=0\,.$$

Вектор фазных напряжений, измеренный относительно искусственной точки заземления (Рис.2), также ортогонален орту нулевой последовательности

$$(\boldsymbol{U},\boldsymbol{e}_0)=\boldsymbol{U}^{\top}\boldsymbol{e}_0=\frac{1}{\sqrt{3}}(\dot{U}_a+\dot{U}_b+\dot{U}_c)=0\,.$$

Таким образом, и вектор (3.а) и вектор (3.б) принадлежат двумерному подпространству 3D-комплексов

$$\{\,\boldsymbol{F}:(\boldsymbol{F},\boldsymbol{e}_0)=\boldsymbol{F}^{\top}\cdot\boldsymbol{e}_0=0\,\}\,, \tag{5}$$

которое ортогонально орту нулевой последовательности ($\boldsymbol{F}^{\top}\boldsymbol{e}_0=0$), а сами процессы двумерны.

Если вектор напряжений $\boldsymbol{U_O}=(\dot{U}_{Oa},\dot{U}_{Ob},\dot{U}_{Oc})^{\top}$, измеряется относительно произвольной точки O то из него «исключается» нулевая последовательность с помощью процедуры приведения

$$\boldsymbol{U}=\boldsymbol{U_O}-\dot{U}_0\boldsymbol{e_0}\,. \tag{6}$$

Здесь $\dot{U}_0=(\boldsymbol{U_O},\boldsymbol{e_0})=(\dot{U}_{Oa}+\dot{U}_{Ob}+\dot{U}_{Oc})/\sqrt{3}$ - проекция вектора $\dot{U}_0$ на орт $\boldsymbol{e_0}$.

Мгновенная и комплексная мощность. Средняя (активная) мощность за интервал наблюдения $[\tau, \tau+T]$

$$P = \frac{1}{T}\int_{\tau}^{\tau+T} p(t)dt = \frac{1}{T}\int_{\tau}^{\tau+T} \boldsymbol{u}(t)^{\top}\boldsymbol{i}(t)dt \qquad (7)$$

определена мгновенной мощностью

$$p(t) = \boldsymbol{u}(t)^{\top}\boldsymbol{i}(t) = u_a(t)i_b(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)\,. \qquad (8)$$

В синусоидальном режиме активную мощность (8) можно вычислить как реальную часть $P = \Re e\dot{S}$ комплексной мощности (КМ)

$$\dot{S} = \boldsymbol{U}^{\top}\boldsymbol{I}^{*} = \dot{U}_a I_a^{*} + \dot{U}_b I_b^{*} + \dot{U}_c I_c^{*}, \qquad \dot{S} = P + jQ\,. \qquad (9)$$

Здесь знак * - операция комплексного сопряжения .

Квадратурные составляющие комплексной мощности

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c$$

заданы мощностями фаз

$$P = \Re e\dot{S} = P_a + P_b + P_c\ , \qquad Q = \Im m\dot{S} = Q_a + Q_b + Q_c \qquad (10)$$

В комплексном пространстве 3D-комплексов определено стандартное комплексное скалярное произведение [4] и КМ (9) равна комплексному скалярному произведению векторов напряжения и тока

$$\dot{S} = \boldsymbol{U}^{\top}\boldsymbol{I}^{*} = (\boldsymbol{U},\boldsymbol{I})\,, \qquad S^{*} = \boldsymbol{I}^{\top}\boldsymbol{U}^{*} = (\boldsymbol{I},\boldsymbol{U})\,. \qquad (11)$$

Сбалансированная компонента тока. Действующие величины 3-фазных синусоидальных токов и напряжений (1-2) равны нормам 3D-комплексов тока и напряжения

$$|\boldsymbol{i}| = I = |\boldsymbol{I}| = \sqrt{|\dot{I}_a|^2 + |\dot{I}_b|^2 + |\dot{I}_c|^2}\ , \qquad (12.а)$$

$$|\boldsymbol{u}| = U = |\boldsymbol{U}| = \sqrt{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 + |\dot{U}_c|^2} \qquad (12.б)$$

В трёхпроводном сечении $<a,b,c>$ между полной мощностью по Бухгольцу [5]

$$S_B = |\boldsymbol{U}|\cdot|\boldsymbol{I}| = U\cdot I \qquad (13)$$

и геометрической мощностью [6,7]

$$S_G = |(\boldsymbol{U},\boldsymbol{I})| = |\dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c| \qquad (14)$$

справедливо неравенство (Коши–Шварца)

$$|\boldsymbol{U}||\boldsymbol{I}| \ge |\boldsymbol{I}^{\top}\boldsymbol{U}^{*}|\,, \qquad S_B \ge S_G\,. \qquad (15)$$

Равенство в (15) достигается тогда и только тогда когда вектор тока и напряжения (к*омплексно*) *коллинеарны* ($\boldsymbol{I} \| \boldsymbol{U}$)

$$|\boldsymbol{U}||\boldsymbol{I}| = |\boldsymbol{I}^{\top}\boldsymbol{U}^{*}| \qquad \Leftrightarrow \qquad \frac{\dot{I}_a}{\dot{U}_a} = \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_b} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_c}\ . \qquad (16)$$

При выполнении (16) будем говорить, что ток (к*омплексно*) *сбалансирован* с напряжением. Если ток *не сбалансирован* с напряжением, то проекция вектора тока на вектор напряжения, определяет компоненту тока $\boldsymbol{I}_b$, не совпадающую с полным током

$$\boldsymbol{I}_b = \frac{(\boldsymbol{I},\boldsymbol{U})}{|\boldsymbol{U}|^2}\boldsymbol{U} = \frac{S^{*}}{|\boldsymbol{U}|^2}\boldsymbol{U} = \dot{Y}_b\boldsymbol{U}\,, \qquad \boldsymbol{I}_b \ne \boldsymbol{I}\ . \qquad (17)$$

Компонента вектора тока (17) коллинеарна напряжению ($\boldsymbol{I}_b \| \boldsymbol{U}$) и определяет трехфазный ток $\boldsymbol{i_b}(t) = \sqrt{2}\Re e[\boldsymbol{I_b}e^{j\omega t}]$ - *ток баланса* с такой же формой кривой как у напряжения (1). Комплексное число

$$\dot{Y}_b = G_b + jB_b = \frac{P}{U^2} - j\frac{Q}{U^2} \qquad (18)$$

определяет *эквивалентную проводимость* тока баланса.

Ток баланса [2,5] имеет однозначный энергетический смысл: *«При заданном напряжении ток баланса определяет ток, который, среди всех токов, которые могут поставлять в нагрузку энергию с такой же комплексной мощностью, что и полный ток, имеет минимальную д.в.»*

$$(\boldsymbol{U},\boldsymbol{I_b}) = (\boldsymbol{U},\boldsymbol{I}) = \dot{S}\,; \qquad |\boldsymbol{I_b}| < |\boldsymbol{I}|\,.$$

Точнее, такую же активную мощность $P = \Re e[\dot{S}]$ при заданном фазовом сдвиге между током и напряжением, равном $arctg(B_b/G_b) = -arctg(Q/P)$.

Для любой трехфазной нагрузки в сечении $< a,b,c >$ справедливо ортогональное разложение

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I}_b + \underbrace{(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{I}_b)}_{\boldsymbol{I}_u} = \boldsymbol{I}_b + \boldsymbol{I}_u \ , \qquad \boldsymbol{I}_b \perp \boldsymbol{I}_u \ . \tag{19}$$

Компонента вектора тока $\boldsymbol{I}_u = \boldsymbol{I} - \boldsymbol{I}_b$ определяет ортогональное дополнение ($\boldsymbol{I}_u \perp \boldsymbol{U}$). Ток этой компоненты будем называть *током небаланса*. Можно показать, что для вектора *тока небаланса* справедливо выражение [4]

$$\boldsymbol{I}_u = \boldsymbol{I} - \boldsymbol{I}_b = \frac{(\boldsymbol{U} \times \boldsymbol{I}) \times \boldsymbol{U}^*}{|\boldsymbol{U}|^2} \ . \tag{20}$$

Векторное произведение комплексных векторов

$$\boldsymbol{U} \times \boldsymbol{I} = \left[\dot{U}_b \dot{I}_c - \dot{U}_c \dot{I}_b, \ \dot{U}_c \dot{I}_a - \dot{U}_a \dot{I}_c, \ \dot{U}_a \dot{I}_b - \dot{U}_b \dot{I}_a \right]^\top \tag{21}$$

вычисляется подобно векторному произведению обычных трехмерных векторов с вещественными координатами. Выражение (21) определяет вектор мощности небаланса $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{U} \times \boldsymbol{I}$ [4]; Здесь $\boldsymbol{U}^* = (U_a^*, U_b^*, U_c^*)^\top$ - комплексно-сопряженный вектор напряжений.

Таким образом, условия: равенство нулю тока небаланса, коллинеарность векторов тока и напряжения и совпадение формы кривых тока и напряжения эквивалентны

$$\boldsymbol{I}_u = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{I} \parallel \boldsymbol{U} \ \Leftrightarrow \ \boldsymbol{I} = \dot{Y}_b \boldsymbol{U} \ . \tag{22}$$

При выполнении (22) будем говорить, что *нагрузка комплексно сбалансирована.* Если проводимость тока баланса (18) чисто активная $\dot{Y}_b = G_b$ (чисто реактивная $\dot{Y}_b = jB_b$), то будем говорить, что нагрузка *активно* (*реактивно*) *сбалансирована*

При этом, активно–сбалансированная нагрузка (даже при симметричном напряжении) может быть не только несимметричной, но и содержать реактивные элементы (как в схеме симметризации Штейнитца [8] , см. также *пример 2*).

Уравнение мощности.

Так как $\boldsymbol{I}_b \perp \boldsymbol{I}_u$ то, для введенных токов, справедлива теорема Пифагора

$$|\boldsymbol{I}_b|^2 + |\boldsymbol{I}_u|^2 = |\boldsymbol{I}|^2 \ , \qquad I_b^{\,2} + I_u^{\,2} = I^2 \ . \tag{23}$$

Умножение (23) на квадрат *д.в.* напряжения приводит к уравнению мощности

$$S_B^2 = S_G^2 + D_u^2 \ , \tag{24}$$

где

$S_G = |\boldsymbol{I}_b| \cdot |\boldsymbol{U}| = I_b \cdot U$ - ранее определенная геометрическая мощность, обусловленная током баланса,

$D_u = |\boldsymbol{I}_u| \cdot |\boldsymbol{U}| = I_u \cdot U$ - мощность небаланса (определена как произведение *д.в.* напряжения и *д.в.* тока небаланса).

Проводимость тока баланса (18) определяет разложение вектора тока баланса

$$\boldsymbol{I}_b = \boldsymbol{I}_a + \boldsymbol{I}_r = G_b \boldsymbol{U} + jB_b \boldsymbol{U} \tag{25}$$

на две компоненты: вектор *активного тока* и вектор *реактивного тока:*

$$\boldsymbol{I}_a = G_b \boldsymbol{U} = \frac{P}{|\boldsymbol{U}|^2} \boldsymbol{U} \ , \qquad \boldsymbol{I}_r = B_b \boldsymbol{U} = \frac{-jQ}{|\boldsymbol{U}|^2} \boldsymbol{U} \ . \tag{26}$$

Имеем выражения для вычисления мощностей соответствующих *д.в.* энергетических компонент тока (активного, реактивного и несбалансированного)

$$P = U \cdot I_a \ , \qquad Q = sign(Q) \cdot U \cdot I_r \ , \qquad D_u = U \cdot I_u \tag{27}$$

Здесь

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & x \ge 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

- функция знака.

Поэтому уравнения для токов (26) и мощностей (10)

$$I_u^2 = I_a^2 + I_r^2 \qquad \Leftrightarrow \qquad S_G^2 = P^2 + Q^2 \tag{28}$$

равносильны.

Подстановка (28) в (24) дает уравнение мощности (квадратичное разложение полной мощности)

$$S_B^2 = P^2 + Q^2 + D_u^2 \tag{29}$$

Коэффициент мощности

$$\lambda^2 = \lambda_P^2 = \frac{P^2}{S_B^2} = \frac{I_a^2}{I_a^2 + I_r^2 + I_u^2} \tag{30}$$

равен единице только, если полный ток равен активному току. При этом нагрузка со стороны источника «видна» как чисто активная и симметричная (дополнительные потери отсутствуют).

Базис симметричных координат

Для трехпроводной нагрузки произвольный 3D-комплекс $\boldsymbol{F}$, характеризующий энергетические процессы в ней (в частности вектор напряжений и вектор полного тока и вектора введенных токов баланса (17) и небаланса (20), активного и реактивного (26) тока), ортогонален орту нулевой последовательности, и принадлежит двумерному подпространству (5). Соответствующий энергетический процесс $\boldsymbol{f}(t) = \sqrt{2}\Re e[\boldsymbol{F}e^{j\omega t}]$ не содержит нулевой последовательности (двумерен).

Если 3D-комплекс удовлетворяет условию (5), то он однозначно раскладывается по ортам [3]

$$\boldsymbol{e_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} 1 \\ \alpha^* \\ \alpha \end{pmatrix}, \qquad \boldsymbol{e_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^* \end{pmatrix} \tag{31}$$

прямой и обратной последовательности ($\alpha = e^{j2\pi/3}$). При этом

$$1 + \alpha + \alpha^* = 0\,, \quad \alpha^2 = \alpha^*\,, \quad \alpha\alpha^* = 1 \tag{32}$$

Справедлива импликация

$$(\boldsymbol{F}, \boldsymbol{e}_0) = \boldsymbol{F}^\top \boldsymbol{e}_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{F} = \dot{F}_1 \boldsymbol{e_1} + \dot{F}_2 \boldsymbol{e_2}\,. \tag{33}$$

Так как орты (31) образуют ортонормированный базис

$$(\boldsymbol{e_l}, \boldsymbol{e_m}) = \boldsymbol{e_l}^\top (\boldsymbol{e_m})^* = \begin{cases} 1, & l = m \\ 0, & l \neq m \end{cases}, \tag{34}$$

то

$$\dot{F}_k = (\boldsymbol{F}, \boldsymbol{e_k}) = \boldsymbol{F}^\top \boldsymbol{e}_k^*\,, \qquad (k = 1,2\,). \tag{35}$$

Матрицы преобразований между фазными и симметричными координатами

3D–вектор напряжения и тока в симметричных координатах

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I_1} + \boldsymbol{I_2} = \dot{I}_1 \boldsymbol{e_1} + \dot{I}_2 \boldsymbol{e_2}\,, \qquad \boldsymbol{U} = \boldsymbol{U_1} + \boldsymbol{U_2} = \dot{U}_1 \boldsymbol{e_1} + \dot{U}_2 \boldsymbol{e_2} \tag{36}$$

запишем в векторно-матричной форме

$$\boldsymbol{I} = [\boldsymbol{e_1}\ \boldsymbol{e_2}]\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{U} = [\boldsymbol{e_1}\ \boldsymbol{e_2}]\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}, \tag{37}$$

где

$$[\boldsymbol{e_1}\ \boldsymbol{e_2}] = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \alpha^* & \alpha \\ \alpha & \alpha^* \end{bmatrix} = \mathcal{F}_0 \tag{38}$$

- усеченная матрица [9] модифицированной матрицы преобразования Фортескью [10]

$$\mathcal{F} = [\boldsymbol{e_1}\ \boldsymbol{e_2}\ \boldsymbol{e_0}] = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix}. \tag{39}$$

Обозначим вектор координат прямой и обратной последовательности тока и напряжений

$$\tilde{\boldsymbol{I}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1, & \dot{I}_2 \end{bmatrix}^\top, \qquad \tilde{\boldsymbol{U}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1, & \dot{U}_2 \end{bmatrix}^\top. \tag{40}$$

Тогда в компактном виде выражения (36) запишутся как

$$\boldsymbol{I} = \mathcal{F}_0 \tilde{\boldsymbol{I}}\,, \qquad \boldsymbol{U} = \mathcal{F}_0 \tilde{\boldsymbol{U}}\,. \tag{41}$$

Эрмитово-сопряженная матрица

$$\mathcal{F}_0^H = (\mathcal{F}_0^\top)^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_2^\top \\ \boldsymbol{e}_1^\top \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^* \\ 1 & \alpha^* & \alpha \end{bmatrix} \tag{42}$$

определяет обратное преобразование из фазовых координат в симметричные координаты

$$\tilde{\boldsymbol{I}} = \mathcal{F}_0^H \boldsymbol{I}\,, \qquad \tilde{\boldsymbol{U}} = \mathcal{F}_0^H \boldsymbol{U} \tag{43}$$

Знак H обозначает последовательное выполнение операций $*$-комплексного сопряжения и $\top$-транспонирования (в любом порядке)

Так как базис (31) ортонормирован (33), то произведение матриц (37) и (41) дает единичную матрицу 2-порядка.

$$\mathcal{F}_0^H \cdot \mathcal{F}_0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_2^\top \\ \boldsymbol{e}_1^\top \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_2^\top \boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_2^\top \boldsymbol{e}_2 \\ \boldsymbol{e}_1^\top \boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_1^\top \boldsymbol{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{44}$$

Матрица (39) ортогональная и поэтому сохраняет скалярное произведение векторов и их коллинеарность. Поэтому, ток баланса инвариантен относительно преобразований (38) и (42).

$\tilde{\boldsymbol{I}}_b = \mathcal{F}_0^H \boldsymbol{I}_b = \dot{Y}_b \mathcal{F}_0^H \boldsymbol{U} = \dot{Y}_b \tilde{\boldsymbol{U}}$

Отметим, что если напряжение симметрично (прямой последовательности $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{U}_1 = \dot{U}_1 \boldsymbol{e}_1$), то ток баланса совпадает с током прямой последовательности, а ток небаланса совпадает с током обратной последовательности

$$\boldsymbol{U} = \dot{U}_1 \boldsymbol{e}_1 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{I}_b = \boldsymbol{I}_1 = \dot{I}_1 \boldsymbol{e}_1\,, \qquad \boldsymbol{I}_u = \boldsymbol{I}_2 = \dot{I}_2 \boldsymbol{e}_2\,.$$

Так как при этом $\boldsymbol{I}_a = (\Re e \dot{I}_1) \cdot \boldsymbol{e}_1$, $\boldsymbol{I}_r = (\Im m \dot{I}_1) \cdot \boldsymbol{e}_1$, то дополнительно к введенной ранее проводимости тока баланса можно ввести и проводимость тока небаланса, которые при симметричном напряжении совпадаю с проводимостями прямой и обратной последовательности

$$\dot{Y}_b = \dot{I}_1 / \dot{U}_1\,, \qquad \dot{Y}_u = \dot{I}_2 / \dot{U}_1\,. \tag{45}$$

При несимметричном напряжении это не верно.

Энергетические процессы в $\triangle$-нагрузке

Применим полученные результаты для нагрузки типа треугольник ($\triangle$-нагрузки, Рис.1).

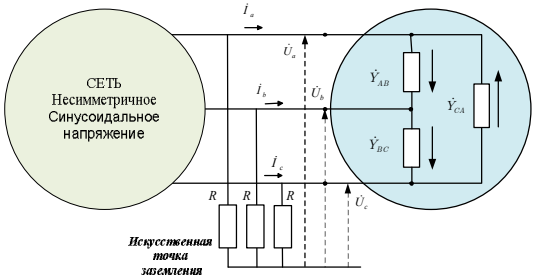


Рис.2 – Трехфазная система с $\triangle$ - нагрузкой

Для векторов межфазных токов и напряжений $\triangle$ - нагрузки

.

$$\boldsymbol{I}_\triangle = (\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca})^\top\,, \qquad \boldsymbol{U}_\triangle = (\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca})^\top \tag{46}$$

справедливо векторно-матричное соотношение

$$\boldsymbol{I}_\triangle = \mathcal{Y}_\triangle \boldsymbol{U}_\triangle\,, \tag{47}$$

– обобщенный закона Ома для межфазных координат. Здесь

$$\mathcal{Y}_\triangle = diag\{\dot{Y}_{AB}, \dot{Y}_{BC}, \dot{Y}_{CA}\} \tag{48}$$

диагональная матрица межфазных проводимостей.

Для выбранных направлений токов между токами в линиях и межфазовыми токами (Рис.2) в узлах подключения нагрузки справедливы соотношения

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \end{aligned}\,, \qquad \boldsymbol{I} = \mathcal{M} \boldsymbol{I}_\Delta\,, \tag{49}$$

где матрица инцидентности $\triangle$ нагрузки (связи межфазных ветвей в узлы)

$$\mathcal{M}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad (50)$$

определена для выбранных направлений ветвей (токов).

Из второго закона Кирхгофа следует, что межфазные и фазными величины напряжения связаны соотношения

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a \end{aligned} \qquad \boldsymbol{U}_{\triangle} = \mathcal{M}^{\top}\boldsymbol{U} \qquad (51)$$

где $\mathcal{M}^{\top}$ – матрица, транспонированная к $\mathcal{M}$.

Для векторов линейных токов (3.а) и узловых напряжений (3.б) справедлив обобщенный закон Ома

$$\boldsymbol{I} = \mathcal{Y}\boldsymbol{U} \qquad (52)$$

Матрица узловых проводимостей Δ - нагрузки

$$, \quad \mathcal{Y} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{AB}+\dot{Y}_{CA} & -\dot{Y}_{AB} & -\dot{Y}_{CA} \\ -\dot{Y}_{AB} & \dot{Y}_{AB}+\dot{Y}_{CB} & -\dot{Y}_{CB} \\ -\dot{Y}_{CA} & -\dot{Y}_{CB} & \dot{Y}_{CA}+\dot{Y}_{CB} \end{bmatrix} \qquad (53)$$

вычисляется прямым перемножением задающих ее матриц $\mathcal{Y}= \mathcal{M}\mathcal{Y}_{\triangle}\mathcal{M}^{\top}$.

Обобщенный закон Ома в симметричных координатах.

Подстановка (40) в закон Ома для $\triangle$ нагрузки (52) дает

$$\mathcal{F}_0\tilde{\boldsymbol{I}} = \mathcal{Y}\mathcal{F}_0\tilde{\boldsymbol{U}}. \qquad (54)$$

Умножим выражение (55) слева на $\mathcal{F}_0^H$. Из (44) следует

$$\tilde{\boldsymbol{I}} = \underbrace{\mathcal{F}_0^H\mathcal{Y}\mathcal{F}_0}_{\tilde{\mathcal{Y}}}\tilde{\boldsymbol{U}} \ , \qquad \tilde{\boldsymbol{I}} = \tilde{\mathcal{Y}}\cdot\tilde{\boldsymbol{U}} \ . \qquad (55)$$

Найдем коэффициенты матрицы (второго порядка) узловых проводимостей в симметричных координатах

$$\tilde{\mathcal{Y}} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_2^{\top} \\ \boldsymbol{e}_1^{\top} \end{bmatrix} \cdot \mathcal{Y} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_2^{\top}\mathcal{Y}\boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_2^{\top}\mathcal{Y}\boldsymbol{e}_2 \\ \boldsymbol{e}_1^{\top}\mathcal{Y}\boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_1^{\top}\mathcal{Y}\boldsymbol{e}_2 \end{bmatrix}. \qquad (56)$$

Из векторно-матричных соотношений

$$\mathcal{M}^{\top}\boldsymbol{e}_1 = \sqrt{3}e^{j\pi/6}\boldsymbol{e}_1, \qquad \mathcal{M}^{\top}\boldsymbol{e}_2 = \sqrt{3}e^{-j\pi/6}\boldsymbol{e}_2. \qquad (57)$$

следует

$$\tilde{\mathcal{Y}} = \begin{bmatrix} 3\boldsymbol{e}_2^{\top}\mathcal{Y}_{\Delta}\boldsymbol{e}_1 & e^{-j\pi/3}3\boldsymbol{e}_2^{\top}\mathcal{Y}_{\Delta}\boldsymbol{e}_2 \\ e^{j\pi/3}3\boldsymbol{e}_1^{\top}\mathcal{Y}_{\Delta}\boldsymbol{e}_1 & 3\boldsymbol{e}_1^{\top}\mathcal{Y}_{\Delta}\boldsymbol{e}_2 \end{bmatrix} \qquad (58)$$

Окончательно для элементов матрицы (57) имеем

$$\dot{Y}_{11} = \dot{Y}_{22} = \dot{Y}_{AB} + \dot{Y}_{BC} + \dot{Y}_{CA} \quad , \qquad (59.а)$$

$$\dot{Y}_{21} = e^{j\pi/3}\dot{Y}_{AB} - \dot{Y}_{BC} + e^{-j\pi/3}\dot{Y}_{CA} \quad , \qquad (59.б)$$

$$\dot{Y}_{12} = e^{-j\pi/3}\dot{Y}_{AB} - \dot{Y}_{BC} + e^{j\pi/3}\dot{Y}_{CA} \quad . \qquad (59.в)$$

Таким образом, при *несимметричном* напряжении линейные токи и фазовые (узловые) напряжения в симметричных координатах связаны векторно-матричным соотношением

$$\tilde{\boldsymbol{I}} = \tilde{\mathcal{Y}}\tilde{\boldsymbol{U}} \quad , \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad . \qquad (60)$$

Если напряжение *симметрично*, то

$$\dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 \ , \quad \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 . \qquad (61)$$

Тем самым, при симметричном напряжении введенные ранее проводимости (45) тока баланса и небаланса можно вычислить через межфазные проводимости

$$\dot{Y}_b = \dot{Y}_{11} = \dot{Y}_{AB} + \dot{Y}_{BC} + \dot{Y}_{CA} \qquad (61.а)$$

$$\dot{Y}_u = \dot{Y}_{21} = e^{-j\pi/3}(\dot{Y}_{AB} + \alpha\dot{Y}_{BC} + \alpha^*\dot{Y}_{CA}) \qquad (62.б)$$

Коэффициент мощности при симметричном напряжении вычисляется через эти проводимости

$$\lambda^2 = \frac{I_a^2}{I_a^2 + I_r^2 + I_u^2} = \frac{(\Re e\dot{Y}_b)^2}{Y_b^2 + Y_u^2} \qquad (63)$$

Примеры. Все примеры сбалансированных нагрузок рассмотрены для *симметричного* напряжения.

Пример 1. Симметризатор-компенсатор Steinmetz [8].

Схема Штейнитца симметризует одноплечевую нагрузку с активной проводимостью G_{AB} путем добавления в два остальных плеча индуктивности и емкости, так что Δ – нагрузка, определена межфазными проводимостями

$\dot{Y}_{AB} = G_{AB}$, $\dot{Y}_{BC} = j\,G_{AB}/\sqrt{3}$, $\dot{Y}_{CA} = -j\,G_{AB}/\sqrt{3}$.

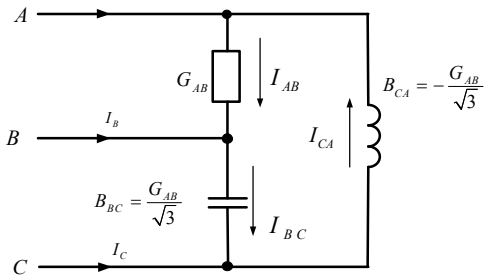


Рис.3 – Схема симметризации Штейнитца

Проводимость тока баланса чисто активная и совпадает с активной проводимостью плеча *AB*. $\dot{Y}_b = G_{AB}$. Проводимость тока небаланса равна нулю, так как $\dot{Y}_{AB} + \alpha\dot{Y}_{BC} + \alpha^*\dot{Y}_{CA} = G_{AB}\{1 + j(\alpha - \alpha^*)/\sqrt{3}\} = 0$.

Нагрузка схемы Штейнитца активно сбалансирована.

Пример 2. Реально сбалансированная нагрузка.

Δ –нагрузка (Рис.4.) задана межфазными проводимостями

$\dot{Y}_{AB} = e^{-j30^0}$, $\dot{Y}_{BC} = e^{j30^0}$, $\dot{Y}_{CA} = 0$.

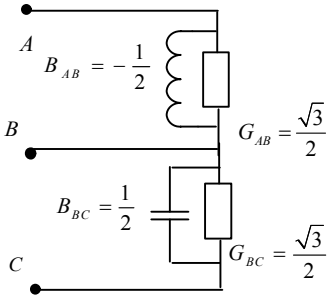


Рис.4 – Реально-сбалансированная нагрузка

Проводимость тока баланса чисто активная $\dot{Y}_b = \dot{Y}_{AB} + \dot{Y}_{BC} + \dot{Y}_{CA} = 2\cos 30^0 = 1$. Проводимость тока небаланса равна нулю $\dot{Y}_u = e^{j60^0}\dot{Y}_{AB} - \dot{Y}_{BC} + e^{j60^0}\dot{Y}_{CA} = 0$.

Также как и в схеме Штейнметца полный ток совпадает с активным током ($\lambda = 1$). Не смотря на то, что нагрузка несимметрична и имеет реактивные элементы, она со стороны источника «*видна*» как чисто активная и симметричная (как реально сбалансированная).

Если схема Штейнметца является схемой полной компенсации реактивного и неуравновешенного тока для одноплечевой нагрузки, то схема (Рис.4) является схемой полной компенсации для двуплечевой активной нагрузки.

Пример 3. Комплексно сбалансированная нагрузка.

Межфазные проводимости равны $\dot{Y}_{AB} = e^{j30^0}$, $\dot{Y}_{BC} = j = e^{j90^0}$, $\dot{Y}_{AC} = 0$.

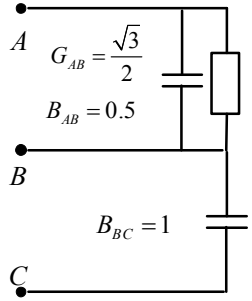


Рис. 5 – Комплексно-сбалансированная нагрузка

Проводимость тока баланса комплексная и равна: $\dot{Y}_b = \sqrt{3}e^{j60^0}$, $G_b = \sqrt{3}/2$, $B_b = j3/2$. Нагрузка комплексно–сбалансирована $\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I_b} = \dot{Y}_b \boldsymbol{U}$, однако реально не сбалансирована ($B_b \neq 0$). Между полным (сбалансированным) током и напряжением имеется фазовый сдвиг $\varphi = \arccos(P/S_G) = 60^0$, который оценивается коэффициентом мощности $\lambda = P/S_G = G_b/Y_b = 0.5$.

Различные примеры сбалансированных и разбалансированных нагрузок при несимметричном напряжении представлены в [11].

Выводы

1. Для трехпроводной нагрузки в синусоидальном несбалансированном режиме проведен математический анализ энергетических процессов, связанных с активной, реактивной мощностью и мощностью небаланса.

2. Показано, как корректно ввести векторное двумерное пространство и ортонормированный базис симметричных компонент для такого анализа.

3. Приведенные примеры показывают, что сбалансированная Δ – нагрузка может быть несимметричной, а предложенный анализ применим для синтеза Δ – компенсаторов с требуемыми энергетическими характеристиками.

Список литературы: **1.** *Зевеке Г.В.* Основы теории цепей / *Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин.*– М. - Л. : «Госэнергоиздат», 1955.–216с. **2.** *Czarnecki L. S.* Powers of asymmetrically supplied loads in terms of the CPC power theory / *L. S. Czarnecki* // Electrical Power Quality and Utilization Journal. – 2007. – Vol. XIII.–No.1.–P.–97–103. **3.** *Sirotin. Iu. A. LC* – Fryze's compensator under asymmetrical voltage /*Iu. A. Sirotin* // Proceed. of the 10-th Conference-Seminar, ISNCC-2010,– Lagow, Poland. – 2010. – P. 160-165. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.isncc2010.iee.uz.zgora.pl/html/program.html. **4.** *Сиротин Ю. А.* Сбалансированная и разбалансированная составляющие тока в трехфазной системе / *Ю. А. Сиротин* //Вісник ПДТУ. – 2008 .– Вип.18.– С. 81-87 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: *www.nbuv.gov.ua/portal/Natural/VPDTU/2008_18_2/C2/18.pdf.* **5.** *Buchholz F.* Die Drehstrom-Scheinleistung bei ungleich-mepiger Belastung drei Zweige / *F. Buchholz* // Licht und Kraft. – 1922.– no. 2.– P. 9-11. **6.** Emanuel A. On the definition of power factor and apparent power in unbalanced polyphase circuits with sinusoidal voltage and currents / A. Emanuel // IEEE Trans. Power Del. – 1993.– Vol.8, no.3. – P. 841–852. **7.** *Emanuel A. E.* On the physical meaning of nonactive powers in three-phase systems / *Z. Cekareski, A.E Emanuel* // Power Engineering Review IEEE. – 1999. – Vol.19, no.7. – P. 46-47. ***8.*** *Steinmetz C. P.* Lectures on Electrical Engineering / *C. P. Steinmetz.* – New York: Dover, 1897. **9.** *Fortescue C.L.* Method of symmetrical components as applied to the solution of polyphase networks / *C.L Fortescue* // Trans. AIEE. – 1918. – Vol. 37. – P.1027–1040. **10.** *Сиротин Ю. А* Схема симметризации Штейнметца как частный случай оптимального компенсатора Фризе / *Ю. А. Сиротин* // Электрика.– 2011.– №1. – С. 16 – 21. [Электронный ресурс].– Режим доступа: *http://www.kudrinbi.ru/public/20464/index.htm.* **11.** *Sirotin Iu. A.* Fryze's compensator and Fortescue transformation / *Iu. A. Sirotin* // Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review).– 2011. – Vol. 1 . – P.101-106.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

УДК 621.315.2

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд.техн.наук.,проф., НТУ «ХПІ»,
Т.Ю. АНТОНЕЦЬ, ЗАТ «Завод Південкабель», Харків

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ З ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силових кабелей напряжением 220 кВ.

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силових кабелей напряжением 220 кВ.

The analysis of datas of calculation of the current rating of cables at direct voltages up to 220 kV.

Постановка проблеми. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах. В практиці користуються, як правило готовими таблицями, які є досить уніфіковані для цілих груп кабелів. Оскільки номенклатура кабелів є дуже широкою і постійно змінюється, проблема визначення пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією є вкрай актуальною. Особливо з огляду на їх відносно високу собівартість, притаманну інноваційному виробництву.

Аналіз літератури. Процеси тепломасообміну в кабелях при їх експлуатації і виготовленні розглядають за допомогою формул (моделей), однакових за своєю структурою і таких, що включають як базові, різницю потенціалів (електричних, теплових, концентрації речовини, тиску), потік, опір, провідність [1]. Відповідно, всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин і математичний опис того чи іншого процесу в системах диференційних рівнянь є досить універсальним і уніфікованим [2].

Пропускна спроможність силових кабелів визначається саме процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах, але практично застосовні розрахункові моделі включають дуже велику кількість припущень і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі [3]. Рекомендація щодо доцільності прямого експериментального чи опосередкованого визначення значень параметрів моделі для розрахунку допустимого струму конкретних кабелів присутня практично в усіх міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287 [4].

Ця серія разом з необхідними нормативними посиланнями в кожному з стандартів, поточними змінами до них включає кілька десятків нормативних документів, в кожному з яких зазначені широкі діапазони значень параметрів розрахункових моделей для традиційних конструкцій кабелів та умов їх застосування. Тому практичне визначення пропускної спроможності для інноваційної продукції безпосередньо за цією нормативною базою неможливе.

Ціль роботи. Розробка методу використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей.

Одержані результати. На рисунку 1 наведені результати розрахунку за допомогою традиційних моделей деяких з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із поліетиленовою зшитою ізоляцією на напругу 220 кВ. Для розрахунків використано найпростіші моделі радіального електричного і теплового полів в однорідній ізоляції одиночного кабелю з багатопроволочною мідною жилою несегментальної конструкції з коефіцієнтом заповнення 0,95. Максимальна допустима температура ізоляції 90 ^{O}C. Основні джерела тепла – жила та ізоляція з відповідними лінійними залежностями від температури електричного опору провідника та фактору втрат в ізоляції. Теплопровідність захисних покривів та навколишнього середовища незмінні.

Видно, що суттєве зменшення максимальної напруженості електричного поля (а отже – підвищення надійності ізоляції в експлуатації) шляхом збільшення товщини ізоляції неодмінно супроводжується зменшенням на кілька відсотків гранично допустимого струму та збільшенням майже в два рази вартості матеріалу ізоляції. А використання більших перерізів жили крім підвищення пропускної спроможності кабелю зумовлює зростання вартості матеріалу жили, що використовується неефективно через явище скін-ефекту і відповідне збільшення електричного опору.

Таким чином, навіть в разі застосування гранично спрощених моделей визначення пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, необхідне одночасне застосування моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

На рисунку 2 наведено приклад такого одночасного застосування електричної і теплової моделей у вигляді системи двох нелінійних рівнянь, що вирішуються разом (пакет MathCad).

Результати рішення моделі, представленої на рис.2 для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю

перерізом 625 мм^2 на напругу 220 кВ свідчать, що зменшення напруженості, наприклад, з 10 кВ/мм до 8 кВ/мм вимагає збільшення товщини ізоляції майже в півтори рази (рис.3 б) і при цьому на декілька відсотків зменшується пропускна спроможність кабелю (рис.3 а). Причому пропускна спроможність зменшується нелінійно: крутіше в діапазоні відносно менших значень напруженості (в області підвищеної надійності ізоляції) (рис.3а).

З усіх застосованих спрощень тільки несегментальна конструкція жили зменшує пропускну спроможність кабелю, але суттєво ускладнює його технологію виготовлення, що потребує окремого розгляду. Інші спрощення дають можливість аналізувати по суті «найкращий сценарій» щодо тенденцій змінювання споживчих властивостей кабелю.

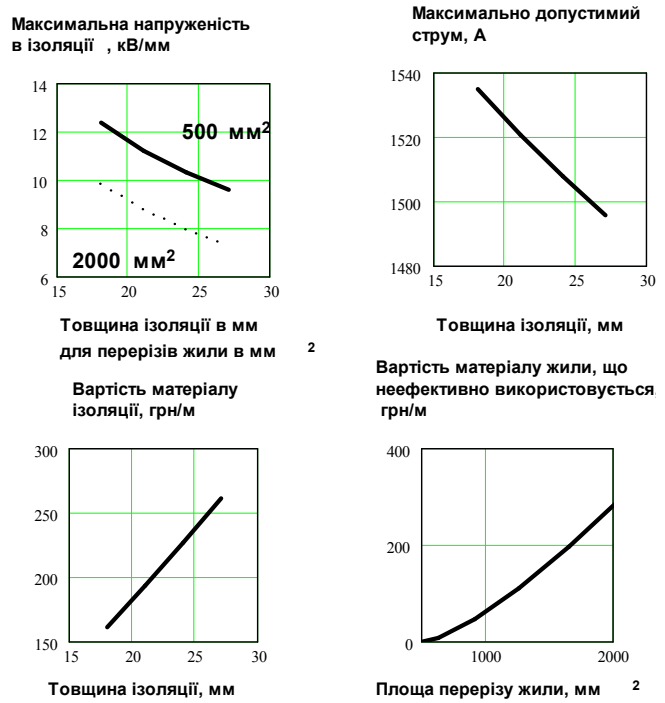
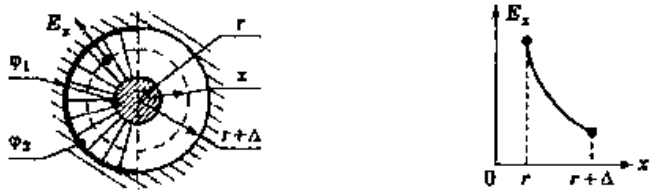


Рис. 1 – Деякі з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ

Те, що зменшення напруженості електричного поля за рахунок збільшення товщини ізоляції зумовлює збільшення витрат на матеріали, є тривіальним і випливає з моделі радіального електричного поля при змінному струмові, яка представлена на рисунку 2.



E_x — напруженість атектричного поля в ізоляції на відстані x від центру жили; r — радіус жили (з урахуванням товщини екрану для екранованих жил); Δ — товщина ізоляції; φ — потенціал; $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — різниця потенціалів

Рис. 2 – Схема простої моделі радіального електричного поля при змінному струмові, яка складає систему на рисунку 2 та схема відповідного графіка розподілу напруженості поля в ізоляції:

Очевидно, що технічне рішення має прийматись з урахуванням електричної, теплової та економічної моделей, які складають систему. Така система представлена на рисунку 3. Вона дозволяє одночасно враховувати конструктивні, електричні, теплові і економічні параметри кабелю. Модель можна ускладнювати, залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника.

Результати розрахунків за моделлю, представленою на рисунку 3, наведено на рисунку 4. Досить виразний оптимум питомих витрат на матеріали в діапазоні товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм (рис.4 в). і відповідність цього діапазону тому факту, що при подальшому зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю (рис.4 а) є важливим результатом саме спільного вирішення окремих відомих розрахункових моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

За цим слід додати, що:

- прості моделі, які складають систему, можна ускладнювати, залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника;

- до системи можуть і повинні бути залучені технологічні моделі, які пов’язують технічні та споживчі параметри кабелю з його технологічними параметрами; очевидно, що зв’язок з економічною складовою системи, а значить і необхідність спільного вирішення, посиляться;

- постійною турботою користувача має стати доцільне спрощення системи, як з огляду на принципову наближеність числових методів її вирішення, так і для забезпечення можливості технічного аналізу результатів.

Конструктивні

$F := 625$ $\Delta zp := 5$ $\eta := 0.95$ $r := \left(\frac{F}{\pi \cdot \eta}\right)^{0.5}$ $\Delta iz := 20$

$\gamma cu := 8.89$ $\Delta e := 1$ $\gamma iz := 1$ $re := r + 2 \cdot \Delta e$

Теплові

$\Theta 1 := 90$ $\Theta 2 := 25$ $\Delta\Theta := \Theta 1 - \Theta 2$

$\sigma iz := 3.7$ $\sigma zp := 4$ $\alpha := 8$

Електричні

$\rho 20 := 0.0172 \cdot 10^{-6}$ $I := 600$

$\rho\Theta := \rho 20 \cdot \left[1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (\Theta 1 - 20)\right]$

$f := 50$ $\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$ $a := \left(2 \cdot \frac{\rho\Theta}{\mu 0 \cdot \omega}\right)^{0.5} \cdot 10^{3}$ $R := \frac{\rho\Theta}{F \cdot 10^{-6}}$

$\mu 0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

$\varepsilon := 2.3$ $Emax := 10$ $Fef := a \cdot \pi \cdot (2 \cdot r - a)$ $Rper := \frac{\rho\Theta}{Fef \cdot 10^{-6}}$

$\varepsilon 0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$

$U := 220000$ $C := (2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon 0) \cdot \left[\ln\left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)}\right]\right]^{-1}$ $\tan := 0.001$

Економічні

$Ccu := 50000$ $mcu := \gamma cu \cdot \left(F \cdot 10^{-6}\right)$ $grcu := Ccu \cdot mcu$ $Csr := 50000$

$Ciz := 50000$ $\gamma sr := 4$ $Fiz := \Delta iz \cdot \pi \cdot \left[2 \cdot r + \frac{(\Delta iz + 2 \cdot \Delta e)}{2}\right]$

$miz := \gamma iz \cdot \left(Fiz \cdot 10^{-6}\right)$ $griz := Ciz \cdot miz$ $Zatr := 5000$

Система з електричної (1), теплової (2) і економічної (3) моделей:

Given

$$Emax = \frac{U \cdot 10^{-3}}{r \cdot \ln\left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)}\right] \cdot 3^{0.5}}$$

$$I = \left[\frac{\Delta\Theta - \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C}{3 \cdot \tan^{-1}} \cdot \left[\frac{\sigma iz}{\pi \cdot 4} \cdot \ln\left(\frac{re + \Delta iz}{r}\right) + \frac{0.5 \cdot 10^{3}}{\pi \cdot \alpha \cdot (re + \Delta iz + \Delta zp)} + \frac{\sigma zp}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{re + \Delta iz + \Delta zp}{re + \Delta iz}\right)\right]}{Rper \cdot \left[\frac{\sigma iz}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{re + \Delta iz}{r}\right) + \frac{0.5 \cdot 10^{3}}{\pi \cdot \alpha \cdot (re + \Delta iz + \Delta zp)} + \frac{\sigma zp}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{re + \Delta iz + \Delta zp}{re + \Delta iz}\right)\right]}\right]^{0.5}$$

$$Zatr = Csr \cdot \gamma sr \cdot \pi \cdot (re + \Delta iz + \Delta zp)^{2} \cdot 10^{-6}$$

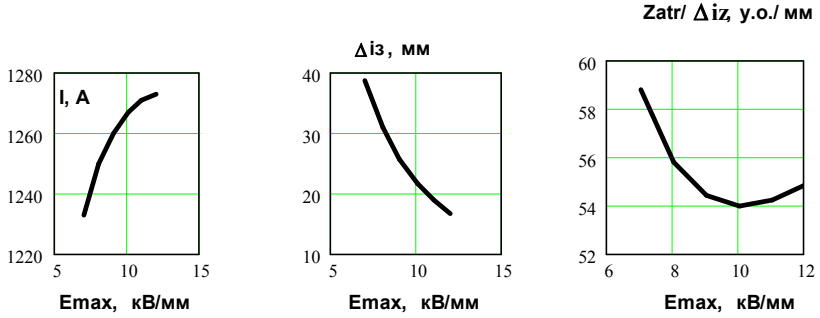
Рішення системи відносно вибраних невідомих: допустимого струму товщини ізоляції , затрат на матеріали

$$Find(I, \Delta iz, Zatr) = \begin{pmatrix} 1.267 \times 10^{3} \\ 21.744 \\ 1.173 \times 10^{3} \end{pmatrix}$$

Рис. 3 – Проста модель для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією

Очевидно, що набір моделей може бути різним, оскільки конкретні значення допустимого струму залежать від багатьох параметрів, наприклад, **конструктивних**: товщина: ізоляції, напівпровідних екранів, електропровідного екрану, захисних елементів конструкції кабелю; параметри конструкції жили: коефіцієнт скрутки, сегментальність; **теплових:** температура мідного екрану, діапазон значень питомого теплового опору вологого грунту, питомий тепловий опір захисних покривів; допустима температура довкілля; **технологічних:** коефіцієнт

заповнення перерізу жили, коефіцієнт нагартовки, технологічна витяжка, **електричних:** напруга, діелектрична проникність ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат ізоляції і його залежність від температури. Спільне вирішення таких моделей дає можливість прийняття оптимальних технічних рішень.



а) б) в)

Рис.4 – Результати спільного рішення електричної, теплової і економічної моделей для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю: а – тривало допустимий (номінальний) струм; б – товщина ізоляції; в – відношення затрат на матеріал ізоляції до її товщини

Висновки.

1) Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

2) Наведене відповідне рішення для одножильного кабелю перерізом 625 мм^2 на напругу 220 кВ. Встановлено, що оптимальний діапазон товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм і при зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю.

3) Визначені перспективні напрямки розвитку запропонованого методу визначення пропускної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією.

Список літератури: **1.** Основы кабельной техники: [учебник для студ. высш. учеб. заведений] / *В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова.* – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с. **2.** *Брагин С.М.* Электрический и тепловой расчет кАбеля. – М.: Энергоатомиздат, 1960. – 328 с. **3.** Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / *В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонець, О.А. Науменко* – Харків.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с. **4.** ДСТУ IEC 60287 – 1, 2, 3. Електричні кабелі . Розрахунок номінального струму.

Надійшла в редколегію 06.10.2011

СОДЕРЖАНИЕ

Артюх С.Ф., Урманов О.Б. Статистический анализ отказов электрооборудования на гидроэлектростанциях Каскада Киевских ГЭС-ГАЭС……. 3

Баженов В. Н. Современные системы релейной защиты и автоматики тяговых подстанций…… 8

Баклай Д.Н., Шутенко О.В. Принципы построения баз данных в информационно-аналитической системе «Сирена»……. 15

Березка С.К., Минченко А.А. Усовершенствованная математическая модель грозозащиты воздушных линий электропередачи напряжением 110 кв и выше и результаты её испытаний……... 23

Бойко А.М., Безпрозванних Г.В. Ефективність екранування витих пар... 29

Веприк Ю.Н. Выбор оптимальных мест установки компенсирующих устройств в электрических сетях……... 36

Гонтарь Ю.Г. Влияние структуры изоляционного материала на распределение грозового перенапряжения на поверхности проходного изолятора…….. 42

Гурин А.Г., Голик О.В., Щебенюк Л.А. Модель для визначення впливу висихання оточуючого грунту на допустимий струм навантаження високовольтного кабелю……. 48

Гурин А.Г., Кутовой В.А., Антонец Ю.А., Карпушенко В.П., Москвитин Е.С. Энергосберегающая экологически чистая вакуумная установка для сушки и пропитки кабелей с бумажной изоляцией…… 55

Ефимовский А.В., Владимиров Ю.В., Кобец Е.С. Дополнительные потери в синхронных двигателях в режиме перевозбуждения……... 70

Загайнова О.А. Аналіз погрішності пристрою безперервного контролю електричних параметрів ізоляції конденсаторного типу у масло наповненому високовольтному устаткуванні……... 78

Лазуренко А.П., Прохоренко Ю.В. Современные методы и устройства компенсации реактивной мощности в бытовых системах электропотребления……. 83

Ложкин Р.С. Моделирование процесса импульсного перемагничивания тороидального ферромагнитного сердечника в наносекундном диапазоне…….. 88

Мирошник А.А. Анализ состояния проблемы качества электроэнергии в сельских сетях……... 100

Рассамакина С.А., Чернокозов А.Ю., Безпрозванних Г.В. Вплив на перехідне загасання телефонних кабелів вариацій часткових ємностей .. 105

Рудевич Н.В. Погрешности трансформаторов тока при несинусоидальных токах……. 111

Сиротин С.А. Анализ энергетических процессов в трехпроводной схеме……. 118

Щебенюк Л.А., Антонець Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією……... 134

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Тематичний випуск
«Енергетика: надійність та енергоефективність»

Збірник наукових праць
№ 41′2011

Науковий редактор
А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.

Технічний редактор
Н.В. Себякіна, І.С. Варшамова

Відповідальний за випуск
канд. техн. наук І.Б. Обухова

Обл. вид. № 149-11

Підп. до друку 04.11.2011 р. Формат 60x84 1/16 Папір офсетний. Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.7. Наклад 300 прим. 1-й з-д 1-60. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе,21