

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 17 (990) 2013

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2013

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 17 (990). – 197с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Спіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.;
В. І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;
В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;
В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Н. В. Рудевич, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: С.Ф. Артюх, д-р техн. наук, проф.; В.Є. Бондаренко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Безпрозванних, д-р техн. наук, доц.; О.П. Лазуренко, канд. техн. наук, доц.; К.В. Махотило, канд. техн. наук, доц.; С.Ю. Шевченко, канд. техн. наук, доц.;

З номеру 42'2012 Вісник НТУ «ХПІ» має власну подвійну нумерацію: № 42 (948).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 4 від 16 квітня 2013 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2013

С. Ф. АРТЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Н. А. ЛЮБИМОВА, канд. техн. наук, доц., ХНАУ, Харьков

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕЧНОЙ ВОДЫ В ЗОНЕ КАСКАДА МАЛЫХ ГЭС

В данной работе рассматривается актуальная задача построения математической модели технического контроля водного объекта в условиях использования последнего каскадом малых ГЭС с целью выполнения норм природопользования. Решение имеет большой технологический, экологический и экономический эффект.

Ключевые слова: математическая модель, распознавание, экология, загрязнение, речная вода

Вступление. В проблеме контроля состояния природной среды содержится задача идентификации источников загрязнения речной воды для принятия мер по их устранению. Это сформулировано в ряде нормативных документов. Большое количество источников загрязнения реки, например каскад малых ГЭС, не позволяет качественно контролировать каждый из них. Часто водопользователи нарушают нормы сбросов, что влечет большие экологические и экономические потери общества. Это обуславливает актуальность данной работы.

Существующая система мониторинга позволяет вести постоянное наблюдение за качественным состоянием воды в некоторых створах водотока. Однако многие задачи оперативного управления водоохранными комплексами требуют более подробной информации о распределении загрязняющего воздействия между источниками сточных вод, действующими на одних и тех же участках реки, свободных от контролируемых створов. Быстрое получение такой информации бывает особенно необходимо в критических ситуациях, когда в каком-нибудь контрольном створе наблюдается превышение установленных норм качества воды. Как правило, такая ситуация является следствием нарушения предельно допустимого сброса (ПДС) сточных вод некоторыми источниками загрязнения, расположенными на участке реки между самым верхним створом, в котором зарегистрировано превышение, и ближайшим к нему сверху другим контрольным створом. В этом случае возникает задача идентификации этих источников загрязнения по показаниям в обоих контрольных створах. Задача идентификации (диагностики) состоит в оценивании состояния и параметров системы по результатам наблюдений над входными и выходными переменными системы, полученными в условиях ее функционирования.

©В.В. Артюх, Н.А. Любимова, 2013

При этом считаются известными структура системы и класс моделей, к которому относится данный объект. Априорная информация обычно достаточно велика. Трудности решения указанной задачи в применении к водоохранным комплексам вызваны, в основном, следующими причинами: сосредоточенностью участков сбора информации, высокой степенью недостоверности данных и отсутствием гибкого математического аппарата их обработки (вследствие чего большая часть из них оказывается неиспользованной). Ниже обсуждаются постановка этой задачи с точки зрения классической теории распознавания образов.

Постановка задачи. Рассмотрим водоток, подверженный воздействию поверхностного стока, с расположенными на нем контрольными створами, которые разбивают его на элементарные участки (каждый такой участок включает в себя по определению ограничивающие его контрольные створы, т.к. является замкнутым). Считаем, что результаты измерений, проводимых в различных контрольных створах, имеют примерно одинаковую достоверность. Поэтому для наблюдения за качественным состоянием воды в интересующем нас створе на данном участке, (например, в створе сброса сточных вод), показания в контрольных створах, лежащих вне этого участка, не несут никакой полезной информации. Таким образом, в качестве объекта задачи идентификации можем взять минимальный участок водотока (предполагаем, что он не разветвлен), ограниченный двумя контрольными створами – фоновым и замыкающим. Пусть далее на этом участке расположено n сосредоточенных источников загрязнения (каскад малых ГЭС), имеющих последовательную нумерацию по течению реки. Загрязняющее воздействие i -го источника ($i=1, \dots, n$) мы будем характеризовать вектор – функцией химического загрязнения в створе сброса сточных вод (в дальнейшем именуемой просто функцией сброса).

$$x_i(t) = (x_{i1}(t), \dots, x_{im}(t))^T,$$

где T – знак транспонирования, m – число контролируемых ингредиентов, $x_{ij}(t)$ – расход в момент времени t массы j -го вещества, сбрасываемого i -м источником со сточными водами. Аналогично, для произвольного створа можно ввести функцию состояния, компоненты которой, в отличие от функции сброса, представляют собой мгновенные массовые расходы веществ, проходящих через поперечное сечение данного створа. Очевидно, функция сброса данного точечного источника равна разности функций состояния двух бесконечно близких створов – выше и ниже створа сброса этого источника. Для простоты обозначений будем считать фоновый створ “первым” источником загрязнения, и рассматривать его функцию состояния как функцию сброса $x_1(t)$.

Предположим, что в течение расчетного периода времени водный режим данного участка является установившимся и уровень влияния распределенных источников загрязнения на функцию состояния $y(t)$ замыкающего створа остается неизменным. Тогда процесс формирования качества воды на данном участке достаточно точно описывается линейной конечномерной моделью

$$y(t) = F(\hat{x}_1(t-\tau_1), \dots, \hat{x}_n(t-\tau_n)) + g(t), \quad (1)$$

где τ_i – время добегающего от i -го источника до замыкающего створа; $g(t)$ – случайная функция невязки с нулевым математическим ожиданием; $F: R_n^m \rightarrow R^m$ – некоторый линейный оператор, неизменный в течение рассматриваемого периода времени, действующий из пространства R_n^m матриц размера $n \times m$ в m -мерное пространство R^m ; $\hat{x}_i(\theta)$ – усреднение функции сброса $x_i(\theta)$ по адекватному временному интервалу:

$$\hat{x}_i(\theta) = \frac{1}{2\varepsilon_i} \int_{\theta-\varepsilon_i}^{\theta+\varepsilon_i} x_i(\theta+\tau) d\tau.$$

Присутствие в модели (6) “сглаженных” функций сброса $\hat{x}_i(\theta)$ выражает тот факт, что для реальных потоков время добегающего τ_i является случайной величиной (предположение о постоянстве времени добегающего приводит к переоценке самоочищающей способности – экологического обобщенного показателя – водного объекта). Поскольку в дальнейшем нигде явно не используются мгновенные значения функций сброса, будем условно считать усреднение $\hat{x}_i(\theta)$ функцией сброса i -го источника и обозначать его $x_i(\theta)$. Такое отождествление понятий оправдано еще и тем, что любые фактические оценки значений функции сброса, так или иначе получаются путем усреднения.

Пусть X_i, Y области допустимых значений для функций сброса $x_i(t)$ и функции состояния $y(t)$, назначаемые, согласно нормативов, ПДС и ПДК для конкретного водного объекта. Единственное необходимое условие задачи идентификации, налагаемое на область Y , состоит в следующем. Если достаточно долго выполняется условие $\forall t: x_i(t) \in X_i$, то, начиная с момента t_0 , должна иметь место ситуация $\forall t \geq t_0: y(t) \in Y$.

На языке модели F это условие можно выразить так: область Y должна содержать образ, при отображении F декартова произведения $X_1 \times \dots \times X_n$, т.е.

$$F(X_1 \times \dots \times X_n) \subset Y \quad (2)$$

Рассмотрим подробнее модель (1). Имеет место следующее свойство аддитивности оператора F :

$$F(X_1 \times \dots \times X_n) = \sum_{i=1}^n F_i(x_i) + b,$$

где b – фоновая составляющая, обусловленная действием распределенных и неучтенных источников; $F_i: R^m \rightarrow R^m$ – некоторый линейный оператор. Ввиду аддитивности оператора F мы можем исключить из рассмотрения контролируемые источники, функции сброса которых известны, а также параметр b , динамически модифицировав функцию $y(t)$ и область Y путем вычитания формального вклада этих источников. Так, модель (1) приводится к виду

$$y = \sum_{i=1}^n F_i(x_i) + g,$$

(мы опускаем временной аргумент); при этом все функции x_i считаются случайными и независимыми.

Предположим, в некоторый момент времени зарегистрирована ситуация $y \notin Y$. В силу условия (2) возможны два случая: хотя бы один – скажем, k -й – источник нарушил норму сброса в соответствующий момент времени, т.е. $x_k \notin X_k$ либо данная ситуация вызвана большим отклонением от нуля значения функции невязки g , т.е. неточностью измерений, нечеткостью модели и т.д.

Вывод. Рассмотренная модель позволяет решить задачу идентификации загрязнителей речной воды в условиях общего пользования каскадом малых ГЭС. В дальнейшем на базе предложенного необходимо разработать более конкретную модель, в которой, используя оптимальное решающее правило, по которому возможно определить всех нарушителей норм сбросов и оценить вероятность ошибки этого правила, служащую критерием его оптимальности. При этом можно осуществлять объективную оценку состояния гидрозкосистемы. Более общая задача – оценивание значений функций сбросов x_i по наблюдениям Y (задача идентификации) в отдельных случаях может быть решена аналогичными методами. Решение ее имеет не только экологический и технологический эффект, но и значительный экономический эффект, достигаемый путем

минимизации технических средств, в частности средств измерений, необходимых для автономного контроля каждого источника загрязнения.

Список литературы: 1. *Качиашвили К. И.* Обнаружение источников загрязнения с помощью автоматических станций контроля качества речной воды / *К. И. Качиашвили* // Регулирование качества природных вод.: сб. научн. тр. – Х.: - ВНИИВО, 1984. – С. 114 – 119. 2. *Биргер И.А.* Техническая диагностика / *И.А. Биргер.* - М.: Наука, 1978. – 240 с. 3. *Белозуров В.П.* Идентификация источника загрязнения речной воды. / *В.П. Белозуров* // в кн.: Проблемы охраны вод., сб. научн. тр. – Х.: - ВНИИВО, 1985. – С. 87 – 91. 4. *Гихман И.И.* Теория вероятности и математическая статистика / *И.И. Гихман, Скороход А.В., Ядренко./* - К.: Вища школа, 1979. – 408 с. 5. *Ефименко В.В.* Оперативный контроль и регулирование процесса биохимической очистки сточных вод / *Ефименко В.В.* // Х.: - ВНИИВО, 1989. - 119 с. 6. *Ванник В. Н.* Теория распознавания образа / *В.Н. Ванник.* - М.: Наука, 1974. – 416с. 7. *Васильев В.И.* Распознающие системы / *В.И. Васильев* - К.: Наукова думка, 1969. – 291с.

Поступила в редколлегию 14.02.2013

УДК 658.389

Идентификация источника загрязнения речной воды в зоне каскада малых ГЭС. / Артюх С.Ф., Любимова Н.А. // Вісник НТУ «ХП», Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – №.17 (990). – С.3-7. Бібліогр.: 7 назв.

В даній роботі розглядається актуальна задача побудови математичної моделі технічного контролю водного об'єкту в умовах використання останнього каскадом малих ГЕС із метою виконання норм природокоористування. Рішення має великий технологічний, екологічний та економічний ефект.

Ключові слова: розпізнавання, математична модель, екологія, річкова вода, забруднювач

In this article is described issue of the day of the formulation mathematic model of technical control of water object for the cascade of the little GES. It is a problem for the realization of the natural law. This decision has big technological, economic and ecological effect.

Keyword: mathematic model, identification, ecology, pollution, water of river

УДК 621.316.953:621.04.8

П.Ф.БУДАНОВ, канд. тех. наук, доц., УИПА, Харьков;
А.М.ЧЕРНЮК, ст. препод., УИПА, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ПЕРЕДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В статье представлен опыт экспериментального определения электрофизических параметров поверхностных электролитических заземлителей (ПЭЗ) на физической модели и в полевых испытаниях. Подтверждена теоретическая основа метода определения сопротивления ПЭЗ.

Ключевые слова: заземление передвижных электроустановок, поверхностных электролитических заземлитель, полевые испытания, электрофизические параметры грунта

Постановка проблемы. В районах, удалённых от развитой энергосети, а так же на объектах, постоянно меняющих своё место расположения нашли широкое применение передвижные электроустановки (ПЭУ) Особенности работы данных энергообъектов (воздействие атмосферных осадков, перепады температур, вибрация, запыление и загрязнение, наличие большого числа контактных соединений распределительной кабельной сети и возможности её повреждения другими механизмами) определяют данный объект, как объект повышенной опасности поражения человека электрическим током. Это накладывают серьезные требования к обеспечению электробезопасности обслуживающего персонала и лиц работающих в непосредственной близости от ПЭУ [1].

Основной мерой обеспечения электробезопасности электроустановках является защитное заземление [2, 3] В соответствие с [4] заземление ПЭУ должно выполняться так же как и для стационарных электроустановок. Однако, сооружение заземляющих устройств с нормируемым сопротивлением заземления для ПЭУ зачастую невозможно по причине их работы на грунтах с высоким удельным сопротивлением. В качестве решения проблемы заземления ПЭУ было предложено использовать поверхностные электролитические заземлители (ПЭЗ) различных конструкций сочетающие обширную поверхность контакта заземлителя с грунтом и минимальные трудовые и временные затраты на монтаж [5,6]. В [7] был предложен метод определения сопротивления ПЭЗ основанный на применении теории перколяции и фрактальной геометрии.

©П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк, 2013

Подтверждение полученных научных результатов возможно путём экспериментального определения электрофизических параметров ПЭЗ.

Обзор базовых теоретических положений. Электролитический способ заземления принципиально отличается от традиционных тем, что удельное сопротивление грунта ρ не является исходными данными при расчёте системы заземления, а есть преднамеренно изменяемой величиной. Это и определяет особенности работы электролитических заземлителей. В процессе работы ПЭУ электролит просачиваясь в грунт образует некоторое объёмное тело электролита в грунте. Форма и размеры данного тела во многом определяют сопротивление всего заземляющего устройства.

Определение формы и свойств рассматриваемого тела уже проводилось авторами статьи экспериментально и частично освещено в [8, 9].

В результате исследований было определено, что при работе ПЭЗ в грунтах с однородной структурой форма электролитического кластера может быть с достаточной точностью описана параболической функцией. В неоднородных грунтах описание формы кластера параболической функцией нельзя считать достоверным ввиду значительного увеличения погрешности аппроксимации. При этом аналитическое описание параметров электролитического кластера представляет значительные трудности, и в реальных условиях эксплуатации ПЭЗ неприменимо. Это было подтверждено дальнейшими экспериментальными исследованиями авторов результаты которых отражены ниже.

Материалы исследования. С целью установления чётких корреляционных связей между фрактальными и электрофизическими свойствами электролитического кластера проведён ряд экспериментальных исследований

Суть метода исследования состоит в следующем: 1. Моделируется образец типичного грунта, обладающего определёнными свойствами (пористость, влажность, фракции частиц и т.д.). Образец помещается на проводящую подстилающую пластину. 2. В массив грунта помещаются датчики, фиксирующие преодоление электролитическим кластером порога перколяции в данной точке. 3. При помощи модели ПЭЗ постепенно формируем электролитический кластер и фиксируем изменение электрического сопротивления характерных путей перколяции (заземлитель – датчик, заземлитель – подстилающая пластина, датчик – датчик). 4. По окончании формирования кластера образец грунта разбирается послойно и фиксируется форма тела образованного электролитическим кластером

Для данных исследований была спроектирована и изготовлена испытательная лабораторная установка (рис. 2).

Установка включает:

1. Резервуар для моделирования структуры грунта, представляющий собой короб размером 500x500x300 мм с разметкой горизонтальных слоёв на внутренней поверхности. На дно короба уложен металлический лист.
2. Коммутатор на клеммы которого выводятся контактные проводники от заглублённых в грунт датчиков.
3. Прибор измерения сопротивления заземления (тип М372).
4. Модель электролитического заземлителя в масштабе 1:10.
5. Датчики: послойные (в виде металлических сеток с ячейкой ромбовидной формы с диагоналями 50x30мм) и точечные (в виде металлических дисков диаметром 25мм)

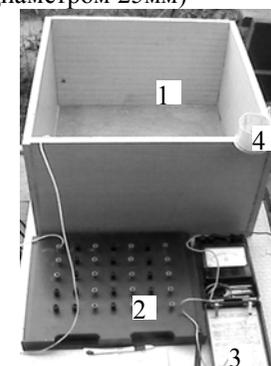


Рис. 1 – Испытательная лабораторная установка

В ходе эксперимента предварительно определялась пористость испытуемого грунта в следующей последовательности:

- отмеряем определённый объём сухого грунта (песок) - $V_{г,мл}$
- постепенно засыпаем сухой грунт в резервуар с заранее определённым объёмом воды - $V_{в,мл}$
- замеряем получившийся общий объём смеси «грунт – вода» $V_{общ, мл}$
- определяем коэффициент пористости грунта как

$$K_{пор} = \frac{V_{г} - (V_{общ} - V_{в})}{V_{г}}, \quad (1)$$

где $V_{г}$ - объём сухого грунта, мл; $V_{в}$ - объёмом воды, мл; $V_{общ}$ - общий объём смеси «грунт – вода», мл.

В нашем случае для грунта «сухой песок»

$$K_{пор} = \frac{200 - (925 - 800)}{200} = 0,375.$$

Далее формировался испытуемый массив грунта послойной укладкой грунта и датчиков (сетки). Было уложено 10 сеток с шагом 20 мм. Контактные провода от сеток выведены на коммутатор. В центре получившегося образца грунта установлена модель электролитического заземлителя. Контакт модели заземлителя с каждой сеткой и нижней металлической пластиной обеспечивается через измерительный прибор и коммутатор.

Формирование электролитического кластера производилось заливкой электролита (кислотный электролит плотностью $1,27 \text{ г/см}^3$) в модель электролитического заземлителя пошагово в объёме 50 мл. После каждого шага замерялось время пропитки электролита в грунт, после чего производились измерения значений сопротивления между моделью заземлителя и контактными клеммами сеток-датчиков (1-10) и подстилающей металлической пластины (общ). Суммарный объём электролита составил 1050 мл.

Таким образом были получены кривые изменения сопротивления «ПЭЗ – датчик (сетка)» для всех сеток и подстилающей проводящей пластины

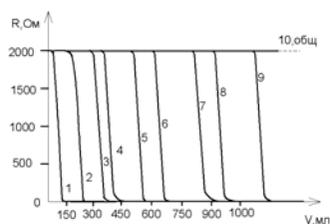


Рис. 2 – Зависимость изменения сопротивления «ПЭЗ – датчик (сетка)» от объёма влитого электролита: 1-10 общ - номера сеток

Как видно из рис. 2 значительное снижение сопротивления «заземлитель - сетка» происходит при образовании устойчивых путей перколяции т.е. при достижении кластером глубины слоя сетки. Падение сопротивления происходит резко до практически нулевых значений, что подтверждает положение о том, что для создания проводимости достаточно создания даже одного пути перколяции.

После всех измерений послойно снимаем грунт и фиксируем форму горизонтальных срезов образованного электролитического кластера. Подстилающей пластины (общ.) электролитический кластер не достиг.

Производим приведение полученных изображений к одному масштабу, графическую обработку и обрисовку горизонтальных срезов электролитического кластера. После чего восстанавливаем форму кластера (рис. 3)

Присутствие горизонтальных сеток в массиве образца грунта обуславливает явно выраженную горизонтальную неоднородность грунта. Подобные неоднородности свойственны слоистым грунтам в частности. Такое строение грунта определяет неправильную форму электролитического кластера. Описание подобной формы кластера аналитическими выражениями практически невозможно. Поэтому традиционные методы расчёта заземлителей, в которых неотъемлемой составной частью расчёта есть определение площади контакта «заземлитель грунт», неприменимы для расчёта электролитического заземления.

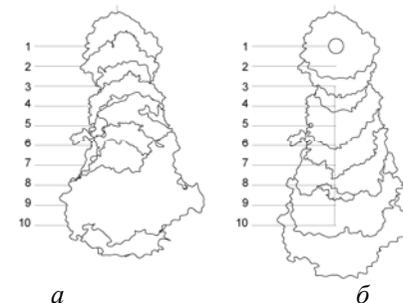


Рис. 3 – Воссоздание формы электролитического кластера: а - вид снизу; б – вид сверху

Дальнейшие исследования проводились с использованием точечных датчиков, что позволили формировать кластер более правильной (параболической) формы и фиксировать динамику развития кластера не только по вертикальной оси, но и в горизонтальной плоскости.

Датчики укладываются в ряды послойно. Каждый ряд имеет 7 датчиков, всего слоёв 5. Контактные провода от датчиков выведены на коммутатор. В центре получившегося образца грунта установлена модель электролитического заземлителя. Контакт модели заземлителя с каждым датчиком и нижней металлической пластиной обеспечивается через измерительный прибор и коммутатор. Схема раскладки датчиков и схема измерительной цепи представлены на рис. 4.

Заливается электролит (раствор медного купороса определённой плотности) в модель электролитического заземлителя пошагово в объёме 50 мл. После каждого шага замеряется время пропитки электролита в грунт, после чего измеряется значения сопротивления цепей: "заземлитель - датчик" (для каждого датчика) R_i ; "заземлитель - подстилающая пластина" $R_{\text{общ}}$; - "датчик - датчик" - R_{i-j} .

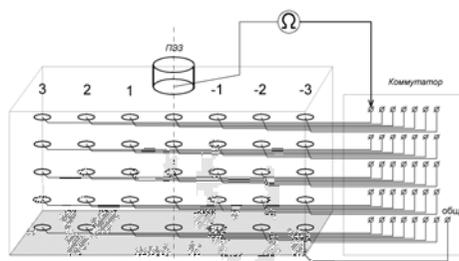


Рис. 4 –Схема раскладки датчиков и измерительной цепи

Исследования проводились для грунтов различной структуры и для электролитов различной плотности и состава. На основании полученных данных были построены информационные поля значений сопротивления для каждого шага измерений, что даёт представление о динамике формирования электролитического кластера и изменения электрофизических параметров ПЭЗ. Построены кривые изменения сопротивления характерных цепочек кластера

Кривые изменения сопротивления цепи «заземлитель – подстилающая пластина» пердставлены на рис. 5.

Целью полевых испытаний ПЭЗ является: подтверждение теоретических положений работы; подтверждение экспериментальных результатов полученных на лабораторной установке; разработка практических рекомендаций по монтажу и эксплуатации ПЭЗ.

Полевые испытания проводились на песчаном грунте с фракцией соответствующей фракции грунта "сухой песок" лабораторных испытаний, описанных выше. Испытания проводились на краю песчаного крьера, что позволило иметь представление о реальной структуре грунта в месте заземления. Данная структура представлена на рис. 6. Грунт в месте заземления имеет незначительный верхний слой (2-3 см) наста из сухой хвои, далее залегает слой практически чистого песка (0,7 - 0,8 м), третий слой толщиной до 1м - песок с включениями органического грунта, нижний слой - песок аналогичный второму слою. Существенное увлажнение грунта наблюдается на глубине около 40см.

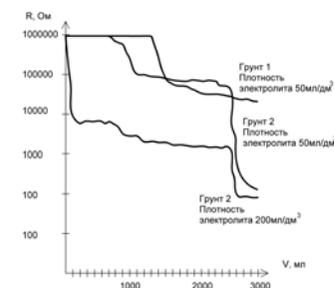


Рис. 5.– Совмещённый график изменения сопротивления для цепи "заземлитель – подстилающая пластина" при различном типе грунта и концентрации электролита

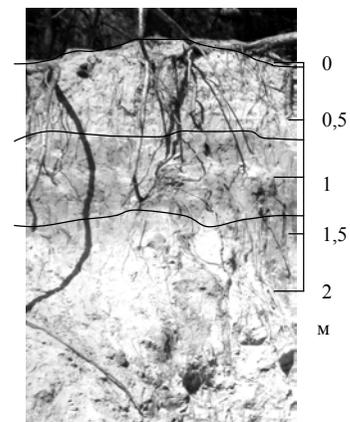


Рис. 6 – Структура грунта в месте полевых испытаний

Заземляемой электроустановкой являлся бензиновый генератор марки Fireman SPG1500. В качестве измерительных электродов использовались металлические толстостенные трубы диаметром 25 мм длиной 2м. Используемый электролит - раствор медного купороса концентрацией 50мг на 1000 мл. Определения сопротивления заземления производилось методом вольтметра-амперметра. Класс точности измерительных приборов 0,5. Общий вид установки представлен на рис. 7. Результаты испытаний представлены в таблице 1



Рис. 7 – Общий вид испытательной установки

Таблица – Результаты полевых испытаний ПЭЗ

№пп	Объём электролита, мл	Показания вольтметра, В	Показания амперметра, А	R _{зз} , Ом
1	1000	186	0,025	6200
2	2000	180	0,03	6000
3	3000	175	0,03	5833,3
4	4000	170	0,035	4857
5	5000	170	0,035	4857
6	10000	165	0,4	412,5
7	20000	164	0,6	273
8	25000	163	0,85	191,7
9	30000	159	2,5	63,6
10	40000	157	2,9	54,14
11	50000	157	3,7	42,43

График зависимости сопротивления заземлителя от объёма влитого электролита представлен на рис. 8

Из графика 8 видно, что порог перколяции преодолевается при объёме электролита равном около 10 л. По результатам предыдущих исследований известно, что объём сформированного электролитического кластера для песчаного грунта с неоднородными включениями превышает объём влитого электролита в 5-11 раз. Учитывая, что полевые испытания проводятся на грунтах под открытым небом и в таком грунте уже присутствует определённое количество влаги к дальнейшим расчётам примем верхнюю границу этого диапазона и объём кластера составит 110 л.

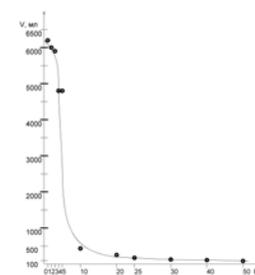


Рис. 8 – Зависимость сопротивления заземлителя от объёма влитого электролита

Для песчаных грунтов форма электролитического кластера может быть принята параболической приближённой к полусферической. Объём полусферы может быть найден как

$$V = \frac{2}{3} \pi R^3 . \quad (2)$$

Решая задачу относительно R получим $R = \sqrt[3]{\frac{110 \cdot 3}{2 \cdot 3,14}} = 3,74 \text{ дм} = 37,4 \text{ см}$.

Отсюда можно сделать вывод о том, что значительное падение сопротивления заземлителя наблюдается в момент достижения электролитическим кластером хорошо увлажнённых слоёв грунта в малым удельными сопротивлением.

При 50 литрах влитого электролита было достигнуто сопротивление менее 43 Ом, что в песчаных грунтах, при условии использования нескольких ПЭЗ может обеспечить приемлемое напряжение прикосновения. Установка одного такого заземлителя позволит обеспечить сопротивление растеканию заземляющего устройства эквивалентного 116 инвентарным буравам или 335 стержневым заземлителям длиной 0,8 м или 59 стержневым заземлителям длиной 2 м.

Выводы.

1. Разработка расчётной модели электролитического заземления возможна с применением теорий перколяции и геометрических фракталов. В общем случае рассматриваемое тело можно представить как электролитический кластер, обладающий как перколяционными так и фрактальными свойствами. В объёме кластера образованы пути перколяции, которые и обеспечивают проводимость электрического тока сквозь массив верхнего слоя грунта (который характеризуется высоким удельным сопротивлением) в водоносные слои обладающие высокой проводимостью. 2. Расчётные методики определения сопротивления электролитического заземления базируются на классических расчётных

моделях стационарных заземлителей и не учитывают особенностей характерных для электролитического заземления. 3. Электролитический кластер ПЭЗ в неоднородных грунтах имеет сложную форму и не может быть описан аналитически. 4. Резкое снижение сопротивления заземления происходит в момент преодоления кластером порога перколяции. Для создания проводимости достаточно даже одного пути перколяции. 5. Модель расчёта сопротивления ПЭЗ может быть разработана на основе перколяционной теории и теории геометрических фракталов.

Список литературы: 1. *Равикович И.Д.* Техника безопасности в передвижных электроустановках/ *И.Д.Равикович.*- М.: Энергия, 1976г., 2. ПУЭ 2009 Правила улаштування електроустановок, 3. ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Національний стандарт України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд, 4. ГОСТ 16556-81 Заземление для передвижных электроустановок. Общие технические условия, 5. *Иванов В.Г.*, Электролитические заземлители. Преимущества и перспективы использования/ *В.Г.Иванов, А.М.Чернюк* // Энергетика та електрифікація.- 2007.- №5, 6 Пат №46648 МПК Н 01 F 27/42. Переносний електролітичний заземлювач/ *Артюх С.Ф., Иванов В.Г., Мезеря А.Ю., Чернюк А.М., Колобродов С.О.*// Заявник та патентовласник УПА. опубл. 25.12.2009 7. *Буданов П.Ф.* Модель перколяції проводимості процесу електролітичного заземлення /*П.Ф.Буданов, А.М.Чернюк* // Озброєння і військова техніка.- 2012.-Вип 2(30) 8. *Буданов П.Ф.* Определение формы объёмного тела электролита в грунте при работе переносных электролитических заземлителей /*П.Ф.Буданов, О.П.Нечуйвітер, А.Ю.Мезеря А.М. Чернюк Ю.А.Пархоменко* // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил.- 2012.- Випуск 1(30) 9. *Чернюк А.М.* Постановка экспериментальных исследований по определению характеристик работы электролитического заземлителя/ *А.М.Чернюк*//; II-я международная научно-практическая конференция «Качество технологий – качество жизни» г.Судак 2010.

Поступила в редколлегию 14.02.2013

УДК 621.316.953:621.04.8

Экспериментальное определение электрофизических параметров поверхностных электролитических заземлителей передвижных электроустановок / Буданов П.Ф., Чернюк А.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.8-17. Бібліогр.: 9 назв. Іл.: 8. Табл.: 1.

У статті представлений досвід експериментального визначення електрофізичних параметрів поверхневих електролітичних заземлювачів (ПЕЗ) на фізичній моделі і в польових випробуваннях. Підтверджена теоретична основа методу визначення опору ПЕЗ, заснованого на теорії перколяції і фрактальної геометрії

Ключові слова: заземлення пересувних електроустановок, поверхневих електролітичний заземлювач, польові випробування, електрофізичні параметри ґрунту

In the article experience of experimental determination of electric parameters is presented superficial electrolytic grounding (SEG) on a physical model and in the field tests. Theoretical basis of method of determination of resistance of SEG, based on the theory of fractal geometry is confirmed. Fig.: 8. Tabl.: 1. Bibliogr.: 9 title.

Keywords: superficial electrolytic grounding, of electric parameters,

УДК 621.316.925 (075.8)

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

АНАЛИЗ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДЛЯ ПОСЛЕАВАРИЙНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы формирования и осмысливания сообщений о состоянии электроустановок, устройств релейной защиты и автоматики в процессе аварийного режима системы электроснабжения.

Ключевые слова : электроснабжение, оперативное управление, конфигурация сети, релейная защита и автоматика, опознания параметров сети и режимов работы

В процессе аварийных событий, происходящих в системах электроснабжения (СЭС), после срабатывания релейной защиты и выключателей, определяющим для оперативного персонала является быстрая и точная оценка событий аварийного режима и принятие правильного решения для восстановления схемы СЭС в послеаварийном режиме (1,2,3). Для электроэнергетических систем, обладающих свойствами непрерывности и быстротечности переходных процессов, оценка событий работы релейной защиты и выключателей должна выполняться автоматически с применением современных средств вычислительной техники. Здесь немаловажное значение имеет наличие информации о предыстории выключателей, объемах и статистики релейной защиты и автоматики. Особое значение для принятия решений имеет анализ работы логической части релейной защиты, которая должна обеспечивать срабатывание по требованию и несрабатывание при внешних повреждениях либо при отсутствии последних. В целом, для надежного оперативного восстановления схемы СЭС в процессе аварийного режима и после него необходимо обладать информацией о конфигурации схемы СЭС, включенных и отключенных цепях, объемах релейной защиты и автоматики, цепях с возникшими повреждениями, отказах основных и резервных защит, излишних и ложных действиях релейной защиты, неправильных действий выключателей и блокировок защиты и автоматики. Главными источниками опознания отключенных электроустановок (ЭУ) и конфигурации сети являются фиксация отсутствия напряжения (ОН) и отключенного выключателя (ОВ). Отключенные электроустановки опознаются путем прослеживания по направлению к источнику питания.

© Баженов В. Н., 2013

Если выключатель отключен или отсутствует напряжение, то электроустановка отключена (ОЭ). Отключенные источники питания обнаруживаются путем замера напряжения с помощью измерительных трансформаторов напряжения TV. Для опознания отключенной ЭУ (ОЭ) используется уравнение

$$ОЭ = ОН + (П_n ОВ), \quad (1)$$

где n относится к выключателям электроустановки от всех источников питания.

Электроустановка отключена (ОЭ), если в ней отсутствует напряжение (ОН) или отключены все n выключатели по направлению к возможным источникам питания ИП (рис.1).

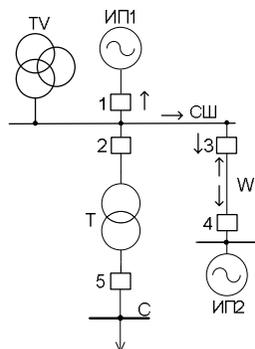


Рис. 1 – Опознание отключенной электроустановки

Опознание отключенных сборных шин. Сборные шины СШ отключены (рис. 1), если отсутствует напряжение (ОН) или отключены выключатели по направлению к ИП1 и ИП2 ($ОВ_1$ и $ОВ_3$):

$$ОЭ_{СШ} = ОН_{TV} + (ОВ_1 \cdot ОВ_3). \quad (2)$$

Опознание отключенной линии. Линия W отключена (рис.1), если отключены выключатели по направлению к ИП1 и ИП2 ($ОВ_3$ и $ОВ_4$):

$$ОЭ_W = ОВ_3 \cdot ОВ_4. \quad (3)$$

Опознание отключенного трансформатора. Трансформатор T отключен (рис. 1), если отключен выключатель по направлению к ИП1 (СШ):

$$ОЭ_T = ОВ_2. \quad (4)$$

Для опознания поврежденных электроустановок используется уравнение

$$ПЭ = ОЭ \cdot \left(\sum_i ОРЗ_i \right), \quad (5)$$

где i – относится ко всем основным защитах электроустановки (ОРЗ).

Поврежденная электроустановка (ПЭ) распознается (рис.2) по отключенному состоянию (ОЭ) и срабатыванию хотя бы одной её основной релейной защиты (ОРЗ).

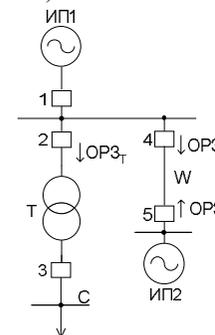


Рис. 2 - Опознание поврежденной электроустановки

Опознание поврежденного трансформатора. Если трансформатор T (рис. 2) отключен ($ОЭ_T$), и сработала хотя бы одна основная защита (газовая $ОРЗ_G$, дифференциальная $ОРЗ_{диф}$, отсечка $ОРЗ_{омс}$), то трансформатор поврежден:

$$ПЭ_T = ОЭ_T \cdot (ОРЗ_G + ОРЗ_{диф} + ОРЗ_{омс}) \quad (6)$$

Опознание поврежденной линии. Линия W (рис. 2) повреждена ($ПЭ$), если она отключена $ОЭ_W$ и получены сигналы хотя бы от одной из основных защит линии ($ОРЗ_3$ или $ОРЗ_4$):

$$ПЭ_W = ОЭ_W \cdot (ОРЗ_3 + ОРЗ_4) \quad (7)$$

Для опознания отказа k -той основной защиты ($ОРЗ_k$) рассматриваемой поврежденной электроустановки применим уравнение :

$$ООРЗ_k = ПЭ \cdot \overline{ОРЗ_k}, \quad (8)$$

где $\overline{ОРЗ_k}$ – относится к несрабатыванию k -той основной защиты поврежденной электроустановки.

Отказ k -той основной защиты электроустановки распознается по факту поврежденной ЭУ и несрабатыванию рассматриваемой защиты, входящей в комплект основных защит. Рассмотрим отказ газовой защиты трансформатора. Основными защитами трансформатора являются

дифференциальная и газовая. Если трансформатор Т (рис. 3), поврежден ($ПЭ_T$), и не сработала одна из основных защит, например, газовая, то логически утверждается факт отказа газовой защиты трансформатора:

$$ООРЗ_T = ПЭ_T \cdot \overline{ОРЗ_T}. \quad (9)$$

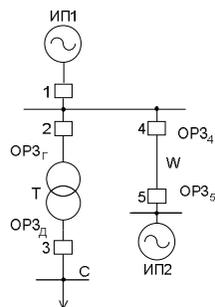


Рис. 3 – Опознание отказа газовой защиты трансформатора

Отказ основной релейной защиты на выключателе $Q4$ линии W . Если в поврежденной линии W (рис. 3), не сработала основная защита со стороны ИП1, то можно утверждать, что произошел отказ защиты $ОРЗ_4$:

$$ООРЗ_4 = ПЭ_W \cdot \overline{ОРЗ_4}. \quad (10)$$

Для опознания отказа в отключении выключателей используется уравнение (11). Факт отказа в отключении n -выключателя электроустановки $ООВ_n$ логически распознается по совокупности опознания поврежденной электроустановки (ПЭ), включенного состояния выключателя, который должен быть отключен ($ВВ$), действия основных ($ОРЗ$) или резервных защит ($РРЗ$) на этом выключателе, и опознания отключенных всех смежных электроустановок ($П_p ОЭ$) или выключателей со стороны источников питания ($П_p ОВ$)

$$ООВ_n = ПЭ \cdot ВВ_n \cdot (ОРЗ_n + РРЗ_n) \cdot (П_p ОЭ + П_p ОВ), \quad (11)$$

где p – относится ко всем смежным ЭУ или выключателям со стороны источников питания.

Пример опознания отказа $Q7$ показан на рисунке 4.

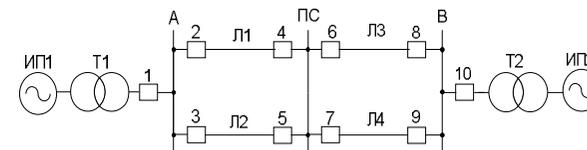


Рис. 4 – Опознание отказа выключателя

Факт отказа выключателя $Q7$ определяется тогда, когда линия $Л4$ повреждена ($ПЭ_{Л4}$), и выключатель $Q7$ включен ($ВВ_7$), сработали основные ($ОРЗ_7$) или резервные ($РРЗ_7$) защиты рассматриваемого выключателя, и отключены пост секционирования (ПС) или смежные выключатели $Q4, Q5, Q6$:

$$ООВ_7 = ПЭ_{Л4} \cdot ВВ_7 \cdot (ОРЗ_7 + РРЗ_7) \cdot [ОЭ_{ПС} + (ОВ_4 \cdot ОВ_5 \cdot ОВ_6)]. \quad (12)$$

Для опознания ложной работы защиты при отсутствии поврежденной электроустановки используется уравнение 13. Ложное срабатывание k -той защиты $ЛС_k$, установленной на выключателе, распознается по отключенному состоянию выключателя ($ОВ$), срабатыванию k -той защиты, несрабатыванию других основных или резервных защит своего выключателя и смежных с стороны питания выключателей.

$$ЛС_k = ОВ \cdot РЗ_k \cdot (П_m \overline{РЗ}), \quad (13)$$

где m – относится ко всем своим и смежным защитам кроме k -той защиты.

Пример опознания ложного срабатывания второй ступени дистанционной защиты (Z'') на выключателе $Q3$ показан на рисунке 5.

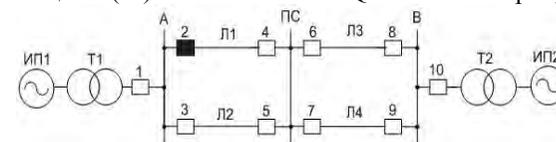


Рис. 5 – Опознание ложной работы защиты

Вторая ступень дистанционной защиты Z'' на выключателе $Q3$ сработала ложно, если $Q3$ отключен, сработала Z'' и не сработали все остальные защиты на своем $Q3$ (Z') и смежном со стороны источника питания $Q1$

$$ЛС_{Z''} = ОВ_3 \cdot РЗ_{Z''} \cdot [(П_{3-Z''} \overline{РЗ}) \cdot (П_1 \overline{РЗ})]. \quad (14)$$

Самопроизвольное отключение k -того выключателя распознается по фактам отключенного выключателя и несрабатыванию всех основных и резервных защит, установленных на рассматриваемом выключателе:

$$HOB_k = OB_k \cdot (\Pi_n \overline{OP3}) \cdot (\Pi_l \overline{PP3}), \quad (15)$$

где n – относится ко всем основным защитам рассматриваемого k -того выключателя; l – ко всем резервным защитам рассматриваемого k -того выключателя.

На рисунке 5 выключатель $Q3$ неправильно (самопроизвольно) отключен, если установлено его отключенное состояние и несрабатывание всех двух основных и четырех резервных защит

$$HOB = OB \cdot (\Pi \overline{OP3}) \cdot (\Pi \overline{PP3}). \quad (16)$$

Неправильное срабатывание основной защиты распознается по фактам отключенного выключателя, срабатыванию рассматриваемой основной защиты и несрабатыванию всех резервных защит данного k -того выключателя

$$HOP3_k = OB_k \cdot OP3_k \cdot (\Pi_k \overline{PP3}). \quad (17)$$

На рисунке 6 дифференциальная защита трансформатора сработала неправильно ($HOP3_d$), если выключатель $Q1$ отключен (OB_{Q1}), сработала дифференциальная защита ($OP3_d$) и не сработали резервные защиты $\overline{PP3_{T1}}$ и $\overline{PP3_{T2}}$

$$HOP3_d = OB_{Q1} \cdot OP3_d \cdot (\overline{PP3_{T1}} \cdot \overline{PP3_{T2}}), \quad (18)$$

где индекс $T1$ – резервная защита со стороны высшего напряжения; индекс $T2$ – со стороны низшего напряжения.

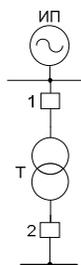


Рис. 6 – Опознавание неправильного срабатывания основной защиты

Успешное восстановление ранее поврежденной электроустановки под действием автоматического повторного включения (АПВ) распознается по фактам действия основных защит, действия АПВ и включенного состояния выключателя

$$АПВПЭ = OP3 \cdot АПВ \cdot ВВ. \quad (19)$$

На рисунке 7 успешное автоматическое повторное включение линии Л2 распознается тогда, когда принят сигнал от АПВ и зарегистрированы действия основной релейной защиты и последнее положение включенного выключателя

$$АПВПЭ_{Л2} = OP3_2 \cdot АПВ_2 \cdot ВВ_2. \quad (20)$$

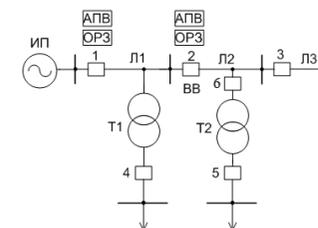


Рис. 7 – Пример опознавания успешного автоматического восстановления ранее поврежденной электроустановки

Для опознавания действия устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ) используется уравнение 21. Действие УРОВ распознается по фактам срабатывания k -той основной релейной защиты, включенного состояния k -того выключателя и отключенного положения всех смежных питающих выключателей

$$УРОВ = OP3_k \cdot ВВ_k \cdot (\Pi_n OB), \quad (21)$$

где k – относится к неотключенному основной защитой выключателю; n – ко всем смежным выключателям от источников питания.

На рисунке 8 срабатывание УРОВ на подстанции ПС распознается тогда, когда после короткого замыкания сработала основная защита $OP3_4$ и зарегистрированы включенное положение четвертого выключателя $ВВ_4$ и отключенные положения смежных 1 и 3-го выключателей (OB_1 и OB_3)

$$УРОВ_{ПС} = OP3_4 \cdot ВВ_4 \cdot (OB_1 \cdot OB_3). \quad (22)$$

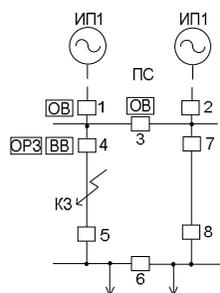


Рис. 8 – Пример опознания срабатывания УРОВ

Выводы. Предложены алгоритмы опознания параметров сети и режимов работы для автоматизации управления системой электроснабжения в процессе и после аварийного режима: опознания отключенных и поврежденных электроустановок, отказах основных защит, отказах в отключении выключателей, ложной работы защит, неправильного отключения выключателей, неправильного срабатывания защит, успешного автоматического повторного включения, срабатывания устройства резервирования отказа выключателя.

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. *Федосеев А.М.* Релейная защита электроэнергетических систем: учебник для вузов / *А.М.Федосеев, М.А. Федосеев* – М.: Энергоатомиздат, 1992.-528 с. 3. *Андреев В.А.* Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов по спец. «Электроснабжение» / *Андреев В.А.* - М.: Высш.шк., 1991.-496 с.

Поступила в редколлегию 05.01.2013

УДК 658.012

Анализ работы релейной защиты и автоматики для послеаварийного восстановления системы электроснабжения / Баженов В.Н // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. - №.17 (990). – С.18-25. Бібліогр.: 9 назв. Іл.: 8.

Розглянуті питання формування осмислених повідомлень про стан електроустановок, пристроїв релейного захисту та автоматики в процесі аварійного режиму системи електропостачання.

Ключові слова: електропостачання, оперативне керування, конфігурація мережі, релейний захист та автоматика, упізнання параметрів мережі та режимів роботи.

The problems of the formation and comprehension of status messages of electric, relay protection and automation in emergency mode power supply system. II. 8

Keywords: power supply, operational management, network configuration, relay protection and automation, identify the network and work

УДК 621.316

М. Й. БУРБЕЛО, д-р. техн. наук, проф., Вінницький нац. техн. ун-т;
С. М. МЕЛЬНИЧУК, інж., Півд. – західна ЕС ДП «НЕК
«Укренерго», Вінниця

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТІВ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ З ОБ'ЄКТАМИ МАЛОЇ ЕНЕРГЕТИКИ (СОЛЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ)

В статті обґрунтовано інформативні параметри для виявлення несиметричних пошкоджень ліній електропередачі, прилеглих до об'єктів малої енергетики. Пропонується в якості інформативних параметрів використовувати відношення струмів зворотної та прямої послідовностей або умовної потужності зворотної послідовності та повної потужності навантаження, а також рівності модулів пристроїв цих струмів або потужностей.

Ключові слова: короткі замикання, неповнофазні режими, відношення струмів, пристрої струмів.

Вихідні передумови та постановка задачі дослідження. За останнє десятиріччя при активній державній підтримці бурхливо розвивається відновлювана енергетика. Так, наприклад, в ФРН на початок 2011 р. 17 % електроенергії генеруються на основі відновлюваних джерел енергії. Не відстає від світових тенденцій і наша держава – введення «зеленого» тарифу стало потужним стимулом розвитку сонячної генерації в Україні.

Приєднання об'єктів малої енергетики на паралельну роботу з мережами енергопостачальних компаній ставить ряд нових задач в напрямку забезпечення стійкості та організації принципів побудови пристроїв релейного захисту і автоматики. Фотоелектричні батареї є джерелом струму з нелінійною вольт-амперною характеристикою, струм КЗ яких складає приблизно 110 % від номінального струму [1]. Зв'язок з електричною мережею і видача потужності фотоелектричної станції (ФЕС) здійснюється за допомогою веденого мережею інвертора. Для захисту лінії зв'язку між енергосистемою і ФЕС рекомендується використовувати два комплекти захисту, що встановлені з обох сторін лінії та які містять три види захисту [2]:

1. Захист від симетричного зниження напруги в усіх фазах;
2. Захист від підвищення напруги зворотної послідовності;
3. Подільний захист від зниження частоти (та підвищення частоти).

Причому на лінії з боку енергосистеми вибираються уставки по часу спрацювання більш на ступінь селективності. Захисти мережі 6-10 кВ, як правило, виконані ненаправленими і розраховані на роботу в розімкненому радіальному режимі.

©М. Й. Бурбело, С.М. Мельничук, 2013

У випадку приєднання ФЕС до шин підстанції (ПС) енергопостачальної компанії двома паралельними лініями при виникненні КЗ на одній з цих ліній виникає проблема селективності захистів, оскільки струм КЗ, як було вказано вище, досить мало відрізняється від номінального струму, а існуючі захисти мінімальної напруги не дають змоги визначити на якому саме з приєднань сталося замикання.

Якщо на одній з відхідних від ПС ЛЕП відбудеться КЗ, то при цьому струм ФЕС зростає незначно в порівнянні з номінальним, а за низького світлового потоку буде нижчим за максимально можливий номінальний. Водночас на шинах ФЕС відбувається зниження напруги і захисти ліній приєднання ФЕС до шин ПС можуть зайво відключити ФЕС [2]. Щоб запобігти цьому, слід розробити і встановити чутливий та селективний тип захисту.

Перспективним напрямком для розробки пристроїв захисту від неповнофазних режимів та для захистів дальнього резервування є застосування пристроїв струмів зворотної ΔI_2 та прямої ΔI_1 послідовностей [3, 4].

Задача дослідження полягає у вдосконаленні захистів в мережах за наявності ФЕС.

Аналіз перспективних підходів виконання захистів приєднань, що живляться від шин ФЕС, в режимах поперечної та поздовжньої несиметрії. На рис. 1 представлено варіант підключення ФЕС до шин 10 кВ ПС 110/35/10 кВ (в якості розрахункового прикладу було розглянуто підключення ФЕС потужністю 10 МВт до ПС 110/35/10 кВ «Пороги» Ямпільського району Вінницької області).

Для захисту приєднань в режимі поздовжньої несиметрії пропонується в якості інформативного параметра використовувати відношення струмів зворотної I_2 та прямої I_1 послідовностей навантаження [5, 6]. І хоча значення струмів I_2 та I_1 при неповнофазному режимі залежать від навантаження, що передається по лінії, їх співвідношення I_2/I_1 є сталим. Наприклад, у разі радіальної мережі за будь-якого значення симетричного навантаження $I_2/I_1=0,5$. В магістральній розподільній мережі у разі приєднання чотирьох споживачів однакової потужності при обриві проводу на початковій ділянці відношення $I_2/I_1=0,5$, при обриві на другій ділянці – $I_2/I_1=0,33$, на третій – $I_2/I_1=0,20$, на четвертій – $I_2/I_1=0,09$.

Згідно проекту ФЕС «Пороги» приєднується до шин 10 кВ ПС 110/35/10 кВ «Пороги» двоколовою кабельною лінією. У разі обриву фази одного з кабелів відношення $I_2/I_1=0,5$, а для непошкодженого кабелю – $I_2/I_1=0,25$. Отже, використання відношення I_2/I_1 дозволяє забезпечити достатню чутливість та селективність для виявлення пошкодженого кабелю.

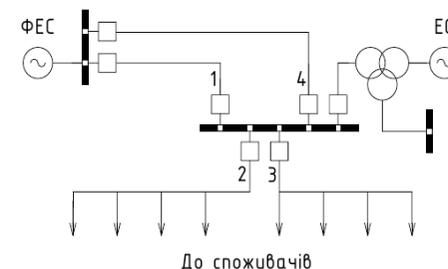


Рис. 1 – Приєднання ФЕС до шин 10 кВ ПС 110/35/10 кВ

Наявність несиметрії навантаження в розподільній мережі дещо погіршує чутливість захисту, в основу якого покладено відношення I_2/I_1 . Несиметрія навантаження характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності струму $K_{2f}=(I_2/I_1) \cdot 100\%$, значення якого може досягати та перевищувати 4 %. На рис. 2 показана векторна діаграма струмів зворотної послідовності на початку магістральної лінії з трьома несиметричними навантаженнями ($K_{2f}=3,5\%$) при обриві проводу різних фаз на третій ділянці. Значення відношення I_2/I_1 при обриві проводу фази A , B або C відповідно будуть: 15 %, 8,8 %; 15,4 %. І хоча чутливість захисту є достатньою, однак при обриві фази B спостерігається істотне зменшення відношення I_2/I_1 , що зумовлено початковим значенням і напрямком вектора I_2 , викликаним несиметрією навантаження.

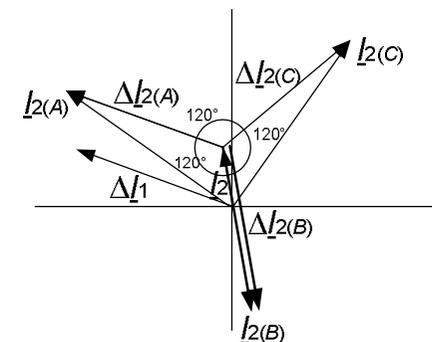


Рис. 2 – Векторна діаграма струму зворотної послідовності при обриві проводу різних фаз

З метою підвищення чутливості, швидкодії та завадостійкості виявлення будь-яких видів несиметричних пошкоджень замість струму I_2 пропонується використання модуля комплексної умовної потужності

Таблиця – Результати розрахунків аварійних режимів

Вид пошкодження	P_2 , квар	Q_2 , квар	S_2/S
КЗ фаз AB	16910	-7738	0,979
КЗ фаз BC	-4959	-8244	0,506
КЗ фаз CA	-11900	15760	1,037
обрив фази A	-585	-351	0,141
обрив фази B	82	415	0,087
обрив фази C	452	-643	0,163
нормальний режим	-15	-190	0,035

зворотної послідовності $\underline{S}_2 = \underline{S}_{21} + \underline{S}_{12} = 3\dot{U}_2 \dot{I}_1 + 3\dot{U}_1 \dot{I}_2$ де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексні напруги та струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; \dot{I}_1, \dot{I}_2 – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей. Замість струму I_1 можна використати повну потужність S .

Дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності визначають з використанням інтегрування на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періода відповідно за формулами [7]:

$$P_2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta) dt, \quad (1)$$

$$Q_2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) dt,$$

де $u_\alpha, u_\beta; i_\alpha, i_\beta$ – миттєві напруги мережі і струми навантаження в ортогональній системі координат (α, β); штрихом позначені тіж величини після попереднього інтегрувального перетворення; T – період напруги живлення.

З метою підвищення швидкодії і зменшення динамічної похибки дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності можна визначати відповідно за формулами:

$$P_2(t) = 0,75(u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta + u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta) \quad (2)$$

$$Q_2(t) = 0,75(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta - u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta).$$

У цьому випадку можливість виключення інтегрування на ковзному інтервалі часу забезпечується використання додаткових складових миттєвих потужностей, які компенсують коливання підінтегральних виразів (1) на періоді напруги живлення,

Результати розрахунків складових потужності P_2, Q_2 та відношення S_2/S за різних видів пошкоджень в прилеглий мережі з розглянутим вище несиметричним режимом наведені в табл.

Як видно з наведеної таблиці, при КЗ значення складових умовної потужності зворотної послідовності досягають досить великих значень, а відношення $S_2/S > 0,5$. Напрямок вектора \underline{S}_2 у разі КЗ різних фаз зсувнутий на 120° . При подальшому дослідженні залежності вектора \underline{S}_2 від характеру навантаження лінії виявлено, що при зміні характеру навантаження від активно-індуктивного до активного та зміщенні точки КЗ вздовж лінії розміщення вектора \underline{S}_2 на координатній площині обмежується достатньо вузькими секторами круга.

Що стосується обривів фаз, то співвідношення S_2/S залишились практично такими ж як і I_2/I_1 . За результатами аналізу неповнофазних режимів встановлено, що складові умовної потужності зворотної послідовності теж можуть використовуватись як фазовий селектор для виявлення пошкоджених фаз.

Для підвищення чутливості захисту відхідних ліній з несиметричним навантаженням від обриву фази пропонується показник визначення неповнофазного режиму I_2/I_1 (або S_2/S) доповнити рівністю модулів приростів струмів ΔI_2 та ΔI_1 (або ΔS_2 та ΔS). При обриві однієї фази на відхідній лінії виникає приріст струму зворотної послідовності ΔI_2 , який по модулю рівний приросту струму прямої послідовності ΔI_1 (див. рис. 2). Для фази A прирости струмів ΔI_2 та ΔI_1 будуть знаходитись у фазі, а для фаз B та C між ними буде зсув 120° . Аналогічні співвідношення справедливі і для приростів умовної потужності зворотної послідовності.

Слід зазначити, що аналогічна ситуація виникає при двофазному КЗ на лінії, що знаходиться в режимі холостого ходу (або при нехтуванні значенням струму в непошкодженій фазі). Для відстройки від такого режиму слід ввести обмеження за значенням $I_1 = I_{ном}$. Тобто при $I_1 > I_{ном}$ будемо вважати, що відбувається КЗ і захист від неповнофазного режиму має заблокуватись, а при $I_1 \leq I_{ном}$ захист від неповнофазного режиму повинен бути уведений в роботу.

Висновки. Пропонується в якості інформативного параметра виникнення неповнофазних режимів в розподільних мережах з об'єктами малої енергетики, зокрема фотоелектричними електростанціями, використовувати відношення струмів зворотної та прямої послідовностей I_2/I_1 або умовної потужності зворотної послідовності та повної потужності S_2/S навантаження. Для захисту відхідних ліній з несиметричним навантаженням пропонується доповнити показник визначення неповнофазного режиму I_2/I_1 (або S_2/S) рівністю модулів приростів

струмів ΔI_2 та ΔI_1 (або потужностей ΔS_2 та ΔS) і використовувати їх як інформативні параметри для виявлення несиметричних пошкоджень відхідних ЛЕП. За результатами аналізу коротких замикань і неповнофазних режимів встановлено, що складові умовної потужності зворотної послідовності можуть використовуватись як фазовий селектор для виявлення пошкоджених фаз.

Список літератури: 1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с. 2. Беляев А. В. Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики (Часть 1) / А. В. Беляев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010. – 84 с. 3. Чернобровов Н. В. Релейная защита энергетических систем: Учебное пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с. 4. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей / В. И. Нагай. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с. 5. Руководство по применению реле AREVA MiCOM P12x: P12x/RU AP F75. Руководство по применению реле AREVA MiCOM P521: P521/RU AP B11. 6. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54–56.

Поступила в редколлегию 11.02.2013

УДК 621.316

Удосконалення захистів розподільних мереж з об'єктами малої енергетики (сонячними електростанціями) / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 17 (990). – С.26-31. Бібліогр.: 6 назв. Табл.: 1. Іл.: 2.

В статье обоснованы информативные параметры для выявления несимметричных повреждений линий электропередачи, прилегающих к объектам малой энергетики. Предлагается в качестве информативных параметров использовать отношения токов обратной и прямой последовательностей или условной мощности обратной последовательности и полной мощности нагрузки, а также равенство модулей приростов этих токов или мощностей.

Ключевые слова: короткие замыкания, неполнофазные режимы, отношения токов, приращения токов.

Informative parameters are justified to identify asymmetric damage power lines adjacent to the power industry of small objects in the article. The authors propose to use as informative parameters of the ratio of currents reverse and forward sequences or conditionally power reverse and full load power and the equality of these modules increments currents or powers.

Keywords: short-circuit, open-phase modes, current ratio, current increment.

УДК 621.316

Ю.В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Д.О. МАЛЫШЕВА, магистрант, НТУ «ХПИ»

О ПРОЕКТЕ НОВОЙ РЕДАКЦИИ «МЕТОДИКИ ОБЧИСЛЕНИЯ ПЛАТЫ ЗА ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МІЖ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАЛЬНОЮ ОРГАНІЗАЦІЄЮ ТА ЇЇ СПОЖИВАЧАМИ»

В статье приведен сравнительный анализ различных редакций Методики расчета платы за перетекание реактивной энергии. Указаны концептуальные ошибки Методики в качестве экономического рычага для стимулирования потребителей к компенсации реактивной мощности в своих сетях. Намечены пути решения проблемы компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Ключевые слова: реактивная мощность, реактивная электроэнергия, компенсация, потребление, генерация.

Как известно, основной задачей компенсации реактивной мощности (КРМ) в электрических сетях всех назначений является уменьшение потерь активной электроэнергии за счет снижения дополнительных потерь, обусловленных протеканием в них реактивной составляющей полного тока. Проблема КРМ в электрических сетях энергосистем и различных электроснабжающих организаций напрямую связана с определением ответственных исполнителей в решении этого вопроса. С точки зрения монополиста (Министерства энергетики), решение этого вопроса обеспечила внедренная в действие «Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами» (в дальнейшем Методика) [1]. Предполагалось, что Методика станет тем экономическим рычагом, который обеспечит привлечение потребителей к КРМ. Фактически же, данная Методика возлагала всю ответственность за КРМ на потребителей электроэнергии, а электроснабжающие организации оставались «в стороне». Многочисленная критика Методики, в т.ч. и одного из авторов этой статьи [2], привела к изданию новой редакции Методики [3], где была предпринята попытка осуществить «косметический ремонт» Методики в соответствии с критическими замечаниями в ее адрес, а термин «енергопостачальна організація» был заменен на термин «електропередавальна організація». Концепция же второй редакции Методики осталась без изменения. Эта редакция Методики вызвала негативную реакцию специалистов [4-7] из-за большого количества

© Ю.В.Владимиров, Д.О.Мальшева, 2013

научно-необоснованных и ошибочных утверждений, да и просто грубых просчетов. Хотя некоторые авторы данной Методики фактически признают ее ошибки и даже косвенно соглашаются, что она не решает задекларированных в ней целей [8,9], однако, не отказываются от ее концепции. Как следствие этого, на официальном сайте Министерства энергетики и угольной промышленности 21.02.2012г. появился проект новой редакции данной Методики [10]. Авторами данной статьи был проведен сравнительный анализ всех редакций этой Методики [1,3,10] (см. таблицу).

Из приведенной таблицы видно, что проект Методики - 2012г. стал еще более сложным и «непрозрачным», что, в частности, никак не способствует реализации цели – привлечение потребителей к КРМ экономическими стимулами. Нужно отметить, что вместо понятных потребителям величин $WQ_{\text{СП}}$ и $WQ_{\text{Г}}$ (потребленной и генерируемой потребителем реактивной электроэнергии), которые определяются непосредственно по показаниям счетчиков, вводится большое количество величин, которые сами по себе требуют расчетов, такие как: $WQ_{\text{СП}}^0$ и $WQ_{\text{Г}}^0$ (суммарные расчетные значения), $WQ_{\text{СП}}^{\text{Б}}$ и $WQ_{\text{Г}}^{\text{Б}}$ (балансовые значения), $WQ_{\text{СП}}^{\text{Т}}$ и $WQ_{\text{Г}}^{\text{Т}}$ (транзитные перетекания) и др. Подобное «нововведение» еще более усложняет расчеты и не имеет ничего общего с «прозрачностью» расчетов.

Нельзя также не отметить ряд других грубых просчетов и ошибок в проекте методики 2012г. Во-первых, как и в предыдущих редакциях Методики нет четкого обоснования потребителей-плательщиков за реактивную мощность, просматривается только тенденция включения в их число как можно больше потребителей. Действительно, в Методике 1997г. – это потребители, которые ежемесячно потребляют 30 тыс. кВт·ч, в Методике 2002г. – это уже потребители, которые ежемесячно потребляют 5 тыс. кВт·ч, а в проекте Методики 2012г. – потребители, у которых суммарная разрешенная мощность всех объектов (т.е. оборудования) равняется 20 кВт и больше (т.е. фактически с такой установленной мощностью оборудования). Выбор потребителей-плательщиков за реактивную мощность во всех редакциях Методики сделан без всяких пояснений. Что же может представлять из себя потребитель с установленной мощностью 20 кВт? Это, например, может быть металлоремонтная мастерская площадью 30-40 кв.м., работающая в одну смену с металлорежущими станками: токарным, строгальным, фрезерным, сверлильным, точильным и др., коэффициент использования активной

Таблица – Порівняння методик обчислення плати за перебігання реактивної електроенергії

Показники	Методика 1997 р. [1]	Методика 2002 р. [3]	Проект методики 2012 р. [10]
	2	3	4
Споживачі, з якими здійснюється розрахунок за споживання реактивної електроенергії	Сумарне середньомісячне споживання активної електроенергії, 30тис. кВт·год	Сумарне середньомісячне споживання активної електроенергії 5000 кВт·год та більше	Сумарна потужність усіх об'єктів 20кВт і більше
Плата за споживання і генерацію реактивної електроенергії	$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3$	$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3$	$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3$
Основна плата за спожиття і генеровану реактивну електроенергію	$\Pi_1 = \sum_{i=1}^n (WQ_{\text{СП}} + K \cdot WQ_{\text{Г}}) \cdot D \cdot T$	$\Pi_1 = \sum_{i=1}^n (WQ_{\text{СП}} + K \cdot WQ_{\text{Г}}) \cdot D \cdot T$	$\Pi_1 = (WQ_{\text{СП}}^{\text{Б}} + K \cdot WQ_{\text{Г}}^{\text{Б}}) \cdot D \cdot T$
Плата за споживання і генерацію реактивної електроенергії при зонному обліку	$\Pi_1 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m WQ_{\text{СП}} + K \cdot WQ_{\text{Г}} \right) \cdot D \cdot T$	$\Pi_1 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m WQ_{\text{СП}} + K \cdot WQ_{\text{Г}} \right) \cdot D \cdot T$	$\Pi_1 = (WQ_{\text{СП}}^{\text{Б}} + K \cdot WQ_{\text{Г}}^{\text{Б}}) \cdot D \cdot T$ $WQ_{\text{СП}}^{\text{Б}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m WQ_{\text{СП}i,j} - \sum_{i=1}^m WQ_{\text{СП}i}^{\text{Т}}$ $WQ_{\text{Г}}^{\text{Б}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m WQ_{\text{Г}i,j} - \sum_{i=1}^m WQ_{\text{Г}i}^{\text{Т}}$

1	2	3	4
Надбавка за недостатне оснащення електричної мережі засобами КРП	$\Pi 2 = \Pi 1 \cdot C_{\text{обс}} \cdot (K_{\phi} - 1)$	$\Pi 2 = \Pi 1 \cdot C_{\text{обс}} \cdot (K_{\phi} - 1)$	$\Pi 2 = \Pi 1 \cdot C_{\text{обс}} \cdot (\text{tg}\phi - 0,25)^2$
Знижка плати за споживання та генерацію реактивної енергії	Розміри знижки обумовлюються с ДРП	Розміри знижки обумовлюються в Договорі	$\Pi 3 = \sum_{j=1}^m W Q_{\text{Тк}} \cdot D_j \cdot T$
ЕЕРП (D)	$D = D1 + D2$	$D = D1 + D2$	$D = D_{\text{EC}} + D_{\text{EO}}$
Розрахунок першої складової ЕЕРП	$D1_{\text{сп}} = \sum_{l=1}^m (D1 \cdot Q_{\text{л}}) / \sum_{l=1}^m Q_{\text{д}}$	$D1_{\text{сп}} = \sum_{l=1}^m (D1 \cdot Q_{\text{л}}) / \sum_{l=1}^m Q_{\text{д}}$	$D1_{\text{EC}}^{\text{сп}} = \sum_{l=1}^m (D_{\text{EC}} \cdot Q_{\text{лнк}}) / \sum_{l=1}^m Q_{\text{лнк}}$
Розрахунок другої складової ЕЕРП	$D_{2\text{сп}} = \sum_{l=1}^m (D_2 \cdot Q_{\text{сп}}) / \sum_{l=1}^m Q_{\text{сп}}$ $D2_{\text{CT}} = d_{\text{CT}} \cdot h \cdot Z_{\text{p}} \cdot 10^{-3} / (U \cdot Z_0)$	$D_{2\text{сп}} = \sum_{l=1}^m (D_2 \cdot Q_{\text{сп}}) / \sum_{l=1}^m Q_{\text{сп}}$ $D_{2\text{сп}} = d_{\text{CT}} \cdot 2R/U^2$	$D_{\text{EO}}^{\text{сп}} = \sum_{l=1}^m (D_{\text{EO}} \cdot Q_{\text{сп}}) / \sum_{l=1}^m Q_{\text{сп}}$
Коефіцієнт урахування збитків енергосистеми	3	3	3

1	2	3	4
Нормативне значення коефіцієнта стимулювання капітальних вкладень С баз	1,3	1,0	1,7
Фактичний коефіцієнт потужності	$\text{tg}\phi = WQ_{\text{сп}}/WP$	$\text{tg}\phi = WQ_{\text{сп}}/WP$	$\text{tg}\phi = WQ_{\text{сп}}^b/WP_{\text{сп}}$
Споживання реактивної енергії в точці, де відсутні прилади обліку	$WQ_{\text{сп}} = \text{tg}\phi_{\text{н}} \cdot WP_{\text{сп}}$	$WQ_{\text{сп}} = \text{tg}\phi_{\text{н}} \cdot WP_{\text{сп}}$	$WQ_{\text{сп}} = \text{tg}\phi_{\text{M}} \cdot WP_{\text{сп}}$
Коефіцієнт потужності	- для тягових підстанцій змінного струму - 1,0; - для тягових підстанцій постійного струму - 0,5; - для промислових споживачів - 0,8; - для перепродавців електроенергії і непромислових споживачів – 0,6	- для тягових підстанцій змінного струму - 1,0; - для тягових підстанцій постійного струму - 0,5; - для інших споживачів – 0,8	Визначається у години максимуму навантаження енергосистеми. За відсутності технічної можливості провести вимірювання коефіцієнт потужності за згодою сторін приймається рівним 0,8.

мощности которых $K_{н}$ за наиболее загруженную смену, согласно [11], равен 0,12-0,14. Легко посчитать, что такой потребитель при использовании энергосберегающих ламп для освещения помещения мастерской будет потреблять в месяц всего 500-600 кВт·ч электроэнергии. Даже предположить, что такой потребитель будет участвовать в КРМ, невозможно.

Во-вторых, неоднократно высказывались замечания, в т.ч. в [2,4,6], что некоторые используемые в расчетах коэффициенты (параметры) научно необоснованны. Это, в частности, касается коэффициента учета ущерба от генерации реактивной электроэнергии с электрических сетей потребителей в часы ночных провалов (К), который во всех редакциях принимается равным 3. Логично поставить вопрос, а почему не принять его равным 2 или, например, 5?

В проекте 2012г. предпринята неубедительная попытка обосновать величину коэффициента стимулирования капитальных вложений ($C_{баз}$) в средства КРМ, которые необходимо установить в электрических сетях потребителя. Данный коэффициент используется для расчета величины надбавки за недостаточное оснащения электрической сети потребителя средствами КРМ (П2), о которой еще будет сказано ниже. Обоснованию же величины $C_{баз} = 1,7$ уделено Приложение 1 проекта Методики 2012г. Не комментируя сам сложный и запутанный расчет $C_{баз}$, хотелось бы отметить, что один из основных параметров расчета, а именно норма дисконта (Е), выбран не правильно. Норма дисконта – это стоимость капитала, т.е. процент, который требуется платить за приобретение капитала для инвестирования в проект, в данном случае внедрение устройств КРМ. Не существует единой стоимости капитала. Стоимость капитала представляется составной величиной, средним показателем, зависящим от того, какие источники капитала будут использованы организацией. При этом учитываются макроэкономические факторы, инфляция, банковский процент и т.п. В проекте Методики предлагается норму дисконта принять равной процентной ставке Нацбанка Украины, что в корне ошибочно. Процентная ставка Нацбанка Украины может быть использована только в некоторых случаях при рефинансировании Нацбанком государственных и коммерческих банков, а также для расчета штрафных санкций. Ни одно промышленное предприятие или организация не могут получить кредит под этот процент. Кроме того, хотелось бы отметить, по всей видимости, и просто ошибочное утверждение, допущенное в разделе 4 Приложения 1: указано, что норма дисконта Е принимается равной 0,775 (т.е. процентная ставка равна 77,5% годовых). Также можно отметить, что, несмотря на пояснения и ссылку на таблицу 5 Приложения 1, не очевидно, что $C_{баз}$ должно равняться 1,7.

Особо хотелось отметить, что надбавка П2 [1,3,10] является, по сути, «повторной платой за потребление (генерацию) реактивной электроэнергии», «дополнительным штрафом», поскольку, если бы оснащение электрической сети потребителя устройствами КРМ было бы достаточным, то и основная плата П1 отсутствовала бы. Потребителя заставляют платить дважды за одно и то же.

Также представляет интерес подмена понятия «энергоснабжающая организация» на «электропередающая организация», что было отмечено в данной статье. Такая подмена понятий представляется просто как юридическая уловка монополиста уйти от возможных судебных исков потребителей электроэнергии к ее продавцам (электроснабжающим организациям). В действительности, электропередающая организация отвечает только за передачу электроэнергии. Возникает вопрос, кто же тогда является продавцом электроэнергии (энергоснабжающей организацией)? Более того, в Методике говорится не об одной электропередающей организации, а о нескольких таких последовательно включенных организациях, независимо от наличия у них лицензий на снабжение электроэнергией по регулируемым тарифам (см. раздел 5.6.6 проекта Методики [10]). А это может позволить «искусственно» создавать любое количество последовательно включенных «электропередающих организаций» и таким образом влиять на оплату за перетоки реактивной энергии.

Также непонятна попытка включения в число плательщиков за перетоки реактивной мощности ВЭС и мини ГЭС, которые являются такими же генерирующими организациями как ТЭС, АЭС и ГЭС большой энергетики. А почему бы тогда не включить в число плательщиков за реактивную мощность гидроаккумулирующие станции (ГАЭС) при работе их в насосном режиме? Кроме того, «нагрузить» дополнительной платой и без того убыточные ВЭС, электроэнергию которых покупают по «зеленым» тарифам, было бы по меньшей мере издевательством.

Проект Методики 2012г. оброс очень большим количеством частных случаев и особых ситуаций, которые необходимо учитывать при расчетах. Фактически уже речь идет о расчетах между всеми субъектами хозяйственной деятельности в сфере генерации и потребления электрической энергии, а не потребителем и поставщиком, таким образом, содержание Методики уже не соответствует ее названию.

Выводы. Необходимо внести предложение о возложении ответственности за КРМ в электрических сетях энергосистемы и электроснабжающих организаций (компаний) на них самих, а потребитель должен в случае, когда он потребляет (генерирует) реактивную электроэнергию платить за это просто по показаниям

счетчиков по единым тарифам, установленным НКРЭ, возможно с учетом нестационарности потребления, как это предлагается в [12].

Список литературы: 1. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами. Наказ міністерства енергетики України №37 від 14.11.97 р. // Офіційний вісник України, 1998, №1. 2. *Владимиров Ю. В.* О методике расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями / *Ю. В. Владимиров* // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Випуск 127. – Харків : ХДПУ, 2000. – С. 105 – 109. 3. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Наказ Міністерства палива та енергетики України №19 від 17.01.2002 р. // Офіційний вісник України, 2002. – №6. 4. *Владимиров Ю. В.* О методике расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями / *Ю. В. Владимиров, И. И. Смелянский*. // Энергетика и электрификация. – 2002. – №11. – С. 31 - 34. 5. *Зорин В. В.* Об оплате за перетоки реактивной энергии в условиях рыночных отношений. / *В. В. Зорин* // Промелектро. – 2004. – №4. – С. 22 – 23. 6. Проблемні питання компенсації реактивної потужності // Промелектро. – 2004. – №5. – С. 4 - 17. 7. *Зорин В. В.* Концепція компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах / *В. В. Зорин* // Промелектро. – 2005. – №3. – С. 24 – 26. 8. *Рогальский Б. С.* Про надбавку до плати за реактивну енергію за недостатнє оснащення мереж споживача засобами компенсації реактивної потужності / *Б. С. Рогальский, О. М. Нанака* // Промелектро. – 2004. – №5. – С. 41 – 44. 9. *Рогальский Б. С.* Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній / *Б. С. Рогальский, О. М. Нанака, А. В. Праховник* и др. // Промелектро. – 2006. – №3. – С. 4 – 15. 10. Офіційний веб-сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України [Електронний ресурс]. – Режим доступа : [http : // mre.kmu.gov.ua](http://mre.kmu.gov.ua). 11. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. *Ю. Г. Барыбина* и др. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с. 12. *Владимиров Ю. В.* О концепции компенсации реактивной мощности / *Ю. В. Владимиров* // Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал. – 2008. – №3 – С. 35 – 40.

Поступила в редколлегию 11.03.2013

УДК 621.316

О проекте новой редакции «методики обчисления плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами» / Владимиров Ю. В., Малышева Д. О. // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2013. – №17 (990). – С.32-39. Бібліогр.: 12 назв. Табл.: 1.

В роботі наведено порівняльний аналіз різних редакцій Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Вказані концептуальні помилки Методики в якості економічного важеля для стимулювання споживачів до компенсації реактивної потужності в своїх мережах. Намічено шляхи вирішення проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Ключові слова: реактивна потужність, реактивна електроенергія, компенсація, споживання, генерація.

The paper presents a comparative analysis of different editions of the Methodology of calculation the payment for overflows of reactive energy. Conceptual errors of the Methodology as economic lever for encourage consumers to compensate the reactive power in its networks were shown. The ways of solving the problem of reactive power compensation in electrical networks were scheduled.

Keywords: reactive power, reactive energy, compensation, consumption, generation.

УДК 621.315.2

О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Б.С. ВЫЛЕЖАНИНА, студентка, НТУ «ХПИ»;
А.Г. ВЕДМИДЬ, студентка, НТУ «ХПИ»

РИСКИ ПРИ ПРИНЯТИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

В работе рассмотрены проблемы рисков изготовителя и заказчика при принятии технологических решений в процессе производства кабельно-проводниковой продукции, приведены методы определения величины риска с помощью гипергеометрического распределения вероятностей. Библ.: 6 назв.

Ключевые слова: контроль качества, кабельно-проводниковая продукция, риск изготовителя и риск заказчика.

Вступление. Традиционные модели менеджмента качества, которые предполагается внедрять в украинской кабельной промышленности используют предположение о том, что все рынки являются конкурентными, и конкуренция рассматривается как основная движущая сила, побуждающая предприятие к неуклонному улучшению своей продукции. Вопрос о мотивации предприятия в целом как экономического субъекта к повышению качества своей продукции в данном случае неактуален – предприятие, не занимающееся постоянным улучшением, вскоре проиграет в конкурентной борьбе, лишится потребителей и выручки, и уйдет с рынка. На конкурентном рынке предприятие всегда заинтересовано в повышении качества своей продукции. Поэтому традиционно исследуется лишь проблема мотивирования персонала (впрочем, сама по себе чрезвычайно непростая, поскольку для достижения конкурентоспособности, каждый работник предприятия должен быть нацелен на удовлетворение запросов потребителей).

Анализ последних исследований и литературы. В настоящее время в Украине производственное предпринимательство является наиболее рискованной формой деятельности. Это связано с тем, что процесс производства включает несколько стадий, на каждой из которых производитель промышленной продукции может понести потери в результате ошибочных действий или негативного воздействия внешней среды [1]. Руководители и специалисты предприятий производящих кабельно-проводниковую продукцию, хотят не только выжить, но и выиграть в борьбе с конкурентами.

© О.В.Голик, Б.С.Вылежанина, А.Г.Ведмидь, 2013

Если говорить о конкретных задачах, которые стоят перед каждым современным предприятием, то это:

- выход на международный рынок;
- повышение качества производимой продукции;
- ликвидация рекламаций, и т.д.

Для решения этих задач им надо повышать качество продукции. Все руководители и специалисты промышленных предприятий это хорошо знают, слова "сертификация", "международные стандарты ИСО (т.е. разработанные *International Standardization Organization* - Международной организацией по стандартизации, сокращенно *ISO*, по-русски - ИСО) серии 9000 по системам качества". Для нашего отечественного производителя несколько непривычно, что управление качеством - прежде всего применение современных методов принятия решений на основе статистического моделирования [2].

Контролем качества продукции обычно занимается отдел технического контроля (ОТК) предприятия. Существуют различные виды контроля промышленной продукции - входной контроль, приемочный контроль (готовой продукции), контроль при передаче полуфабрикатов и комплектующих из цеха в цех. Кроме сплошного контроля всех изделий подряд применяют выборочный, когда о качестве партии продукции судят по результатам контроля некоторой части - выборки [3].

Цель исследований постановка проблемы. Зачем нужен выборочный контроль? Т.е. при разрушающем контроле необходимо пользоваться выборочными методами и судить о качестве партии продукции по результатам контроля её части - выборки. Например, поредделение электрической и механической прочности изоляции эмальпроводов осуществляется в результате разрушающих испытаний. Испытанный провод непригоден для дальнейшего использования, поэтому испытания выполняют на относительно небольшом количестве изготовленного провода, то есть контроль электрической и механической прочности изоляции эмальпроводов является выборочным. Поэтому существует проблема: недостаточная информация о качестве продукции, полученная в результате испытаний и большое количество отходов при разрушающих испытаниях.

Материалы исследований. Выборочные методы контроля могут применяться и из экономических соображений, когда стоимость контроля высока по сравнению со стоимостью изделия.

Для проведения выборочного контроля необходимо сформировать выборку, выбрать план контроля. А если план имеется - полезно знать его свойства. Анализ и синтез планов проводят с помощью математического моделирования на основе теории вероятностей и математической статистики.

Выборочный контроль всегда сопряжен с возможностью ошибки в принятии решения. В классической теории выборочного контроля такие ошибки различают по тому, чьи интересы в первую очередь задевает та или иная ошибка. Соответственно их называют риски изготовителя и заказчика.

Риск изготовителя *Rizg* является вероятностью того, что в результате контроля будет признана не соответствующей техническим требованиям партия изделий, которая на самом деле соответствует этим требованиям. Величина его при прочих равных условиях всегда тем меньше, чем меньше объем испытаний. Риск заказчика *Rzak* является вероятностью того, что в результате контроля будет признана соответствующей техническим требованиям партия изделий, которая на самом деле не соответствует этим требованиям. Величина его при прочих равных условиях всегда тем больше, чем меньше объем испытаний. То есть уже на качественном уровне очевидным является противоречие требований изготовителя и заказчика к относительному количеству продукции, подвергаемой разрушающим испытаниям.

Для количественного анализа рисков изготовителя и заказчика традиционно [4] используют гипергеометрическое распределение вероятностей. На основе этого распределения составляют планы контроля, в которых ограничивают количество дефектных изделий сверху так называемым приемочным числом: $d \leq c$, где d - количество дефектных изделий в выборке. Для построения оперативной характеристики вводят приемочного числа c , такого, что при $d \leq c$ партию признают соответствующей техническим требованиям, а при $d > c$ партию признают несоответствующей техническим требованиям. Количество несоответствующих изделий в партии нормируют на двух уровнях: D_d - допустимое число несоответствующих изделий в партии; D_n - недопустимое число несоответствующих изделий в партии. Поэтому могут быть вычислены два значения оперативной характеристики.

Соответствующие величины риска изготовителя и риска заказчика для планов одновыборочного контроля определяют с помощью классического определения вероятности [5]:

$$Rizg = 1 - \sum_{d=0}^c \frac{\left(\frac{Dd!}{d!(Dd-d)!}\right) \cdot \left(\frac{(N-Dd)!}{(n-d)!(N-Dd-n+d)}\right)}{\frac{N!}{n!(N-n)!}}, \quad (1)$$

$$Rzak = \sum_{d=0}^c \frac{\left(\frac{Dn!}{d!(Dn-d)!}\right) \cdot \left(\frac{(N-Dn)!}{(n-d)!(N-Dn-n+d)}\right)}{\frac{N!}{n!(N-n)!}}, \quad (2)$$

где N – объем партии, n – объем выборки, c – приемочное число, d – количество дефектных изделий в выборке, обнаруженное в результате испытаний, Dd – количество дефектных изделий в партии при нормальном ходе технологического процесса, Dn – предельное допустимое количество дефектных изделий в партии в соответствии с технической документацией.

Согласование всех параметров контроля путем вычисления оптимального объема выборки n составляет задачу планирования выборочного контроля массовых изделий. Все классические решения для конкретных планов выборочного контроля массовой продукции приводят к результатам, которые свидетельствуют о противоречии интересов потребителя и производителя продукции в том, что касается объема испытаний.

Результаты исследований. Опираясь на решения практических задач [4] можно сделать вывод о том, что для согласования рисков необходимо увеличивать объем выборки при испытаниях кабельно-проводниковой продукции. При этом риски остаются достаточно высокими (более 20 %), а разрушающим испытаниям подвергаются почти 20 % изготовленных изделий [6].

Выводы. Таким образом, существуют технические задачи, в которых контроль должен быть сплошным, а не выборочным. В этом случае необходимо обеспечить неразрушающий характер контроля и его экономическую доступность. Только применение сплошного контроля наряду с выборочным дает возможность обеспечить максимальный контроль качества массовой продукции.

Список литературы: 1. Христиановский В.В. Экономический риск и методы его измерения. / В.В. Христиановский, В.П. Щербина. – Донецк: ДонНУ, 2000. – 197 с. 2. Карпушенко В.П. Силовые кабели низкой та средней нагрузки. Конструирования, технология, якість. / В.П. Карпушенко, Л.А. Шебенюк, О.А. Науменко, Антоненко Ю.О. – Харьков: Регион-Информ., 2000.- С. 270 – 289. 3. Холодный С.Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов / С.Д. Холодный. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200с. 4. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Шторм Р. – М.: «Мир», 1970. – 268 с. 5. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей / Гнеденко Б.В. – М.: Наука, 1988. – 446 с. 6. Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двухслойной полиимидной изоляции эмалипровода в процессе производства: дисс. канд. техн. наук: 05.11.13 / Голик Оксана Вячеславовна. – Х., 2009. – 180 с.

Поступила в редколлегию 28.02.2013

УДК 621.315.2

Риски при принятии технологических решений в процессе производства кабельно-проводниковой продукции / Голик О.В., Вылежанина Б.С., Ведмидь А.Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С. 40-43. Бібліогр.: 6 назв.

В роботі розглянуті проблеми ризиків виробника та замовника при прийнятті технологічних рішень у процесі виробництва кабельно-провідникової продукції, наведені методи визначення ризику за допомогою гіпергеометричного розподілу ймовірностей.

Ключові слова: контроль якості, кабельно-провідникова продукція, ризик виробника та ризик замовника.

In-process the considered problems of risks of producer and customer are at acceptance tekhnological decisions in the process of production cable-explorer to the products, resulted methods of determination of rizika by hypergeometrical probability distribution.

Keywords: control of quality, cable-explorer products, risk of producer and risk of customer.

О.Г. ГРИБ, д-р.техн.наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Р.В. ЖДАНОВ, инж., РЭС АК «Харьковоблэнерго», Красноград;
Д.А. ГАПОН, доц. НТУ «ХПИ»;
А.А. ЗУЕВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ КАК ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Статья посвящена вопросу измерения частоты переменного напряжения электрической сети. Рассмотрены результаты математического моделирования различных методов измерения на примере реального сигнала, полученного с помощью цифрового регистратора. Сделаны выводы о выборе оптимального метода и интервала наблюдения при анализе качества электрической энергии.

Ключевые слова: энергосистема, качество электроэнергии, измерение частоты.

Частота основной гармоники питающего напряжения промышленной сети является одним из важнейших показателей качества электрической энергии. Длительная работа при значительном отклонении частоты от номинального значения приводит к повышенному износу оборудования и преждевременному выходу его из строя. Понижение частоты приводит к снижению производительности многих механизмов и, как следствие, недоставке продукции. Ограничения, накладываемые нормативными и техническими требованиями на точность поддержания значения частоты, являются наиболее жесткими, по отношению к ограничениям на другие параметры электрического тока. Следует также отметить, что несоответствие частоты номинальному значению может приводить к возникновению дополнительных погрешностей при выполнении измерений других параметров электрического сигнала. Поэтому задача измерения частоты основной гармоники напряжения промышленной сети является актуальной задачей. Это подтверждается множеством публикаций в научных изданиях по всему миру, посвященных совершенствованию методов и средств измерения частоты [1-5].

При выборе метода измерения необходимо учитывать целый ряд факторов, влияющих на результаты связанных с наличием и величиной отклонений формы напряжения от синусоидальной. Так, многие методы измерения чувствительны к наличию высших гармонических составляющих и требуют обязательной предварительной фильтрации [1].

© О.Г.Гриб, Р.В.Жданов, Д.А.Гапон, А.А.Зуев, 2013

Однако, наиболее трудной задачей является отстройка измерительного органа частоты от влияния аperiodических составляющих, имеющих место во время электромагнитных переходных процессов [2]. Несмотря на относительную редкость таких явлений, они могут оказывать заметное влияние на общие результаты наблюдений. Целью данной статьи является выбор методов, позволяющих минимизировать влияние переходных процессов на эффективность измерений.

Наиболее часто применяемыми методами измерения частоты является метод выделения периода по моментам пересечения сигналом напряжения нулевого уровня с последующим пересчетом частоты [1,4], а также методы реализующие спектральный анализ с применением дискретного преобразования Фурье и его модификаций [2,4,5]. Кроме того, достаточно перспективными представляются методы измерения параметров электрических сигналов использующих аппроксимацию входного сигнала методом наименьших квадратов. Таким образом, для исследования были выбраны следующие методы измерения частоты:

- метод, на базе метода наименьших квадратов выполняющий аппроксимацию входного сигнала специальной функцией, далее обозначаемый НК;

- метод, вычисляющий значение частоты как скользящее среднее из трех последовательных значений, рассчитываемых по моментам пересечения с нулевым уровнем. Аналогичный метод применяется в устройствах ABB SPAF140C, SPAF340C, поэтому далее обозначен как ABB;

- метод, вычисляющий частоту как медиану из трех последовательных значений, полученных по моментам пересечения кривой входного сигнала с нулевым уровнем. Данный метод применяется в устройствах RELCIS и обозначен как REL;

- метод, использующих дискретное преобразование Фурье для получения комплексного вектора основной гармоники напряжения, обозначенный далее как DFT. Отклонение частоты от номинального значения вычисляется по разности углов двух векторов основной гармоники напряжения отстоящих друг от друга на время, равное одному периоду основной гармоники номинальной частоты.

Длительность интервала наблюдения для всех рассмотренных методов примерно соответствует трем периодам основной гармоники. Однако, следует отметить, что при отклонении частоты длительность интервала наблюдения для методов ABB и REL будет изменяться, в то время как для методов НК и DFT время наблюдения остается постоянным независимо от текущего значения частоты. Учитывая небольшой диапазон изменения частоты в энергосистеме, в котором допускается длительная

работа (49,0...50.5 Гц) этими отклонениями можно пренебречь. Кроме того, для метода DFT необходимо наличие двух последовательных вычисленных комплексных векторов основной гармоники, отстоящих на величину одного периода основной гармоники, поэтому, фактически, для вычисления значения частоты необходимо четыре полных периода основной гармоники. Несмотря на указанные особенности, рассматриваемые методы можно считать приближенно равными по быстродействию. Такая длительность интервала наблюдения позволяет получить достаточно высокую точность и, в то же время, позволяет отследить незначительные колебания частоты в энергосистеме, что способствует повышению точности измерения других параметров электрических сигналов. Кроме того, указанная длительность позволяет получить достаточное число измерений, для выполнения усреднения за период предусмотренный стандартом.

В качестве тестового сигнала использовались сигналы, полученные с помощью цифрового регистратора на шинах 110 кВ. Результаты измерений показаны на рис. 1.

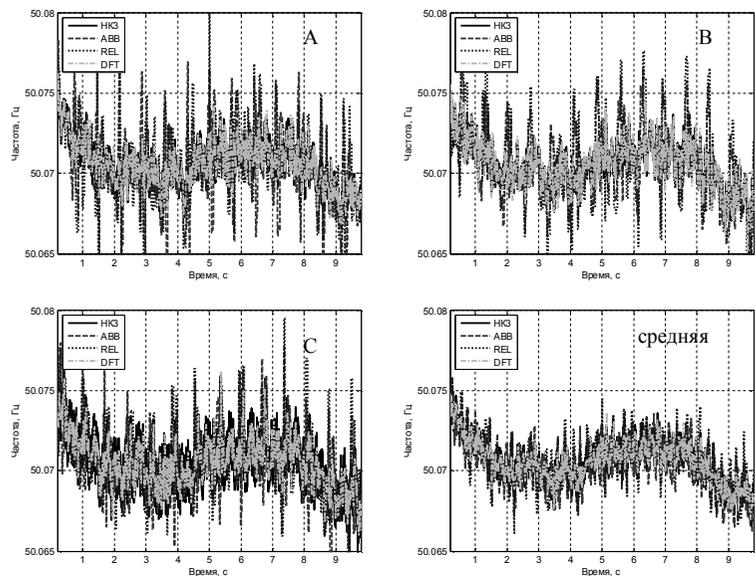


Рис. 1 – Результаты измерения частоты в фазах А, В, С и среднее значение

Из рисунка видно, что результат измерения содержит шумовую составляющую, которая отличается для различных методов и для различных фаз. В то же время, совпадение значений и общего характера

изменения частоты позволяет говорить о том, что измеренное значение отражает реальную скорость вращения машин в энергосистеме.

Более детально рассмотреть результаты измерения позволяют рис. 2 и 3, отражающие фрагменты измерений на промежутках длительностью 2 и 0,5 с соответственно.

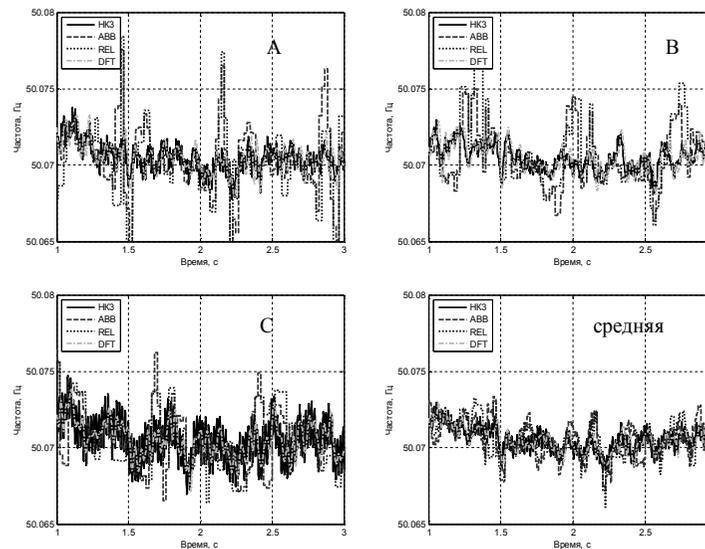


Рис. 2 – Результаты измерения частоты в фазах А, В, С и среднее значение

Фактически, при реализации измерения необходимо решить оптимизационную задачу, для нахождения оптимального сочетания быстродействия, помехоустойчивости и точности. Теоретически можно получить сколь угодно высокими, любые две из указанных характеристик, но в ущерб оставшейся. То есть можно получить высокую точность и быстродействие, но при этом любая помеха или искажение входного сигнала будет приводить к значительной ошибке. Реализация измерения с высокой помехоустойчивостью и точностью потребует значительного интервала наблюдения и т.д.

Логично предположить, что существует некоторый теоретический предел, преодолеть который невозможно, независимо от выбора метода измерения. Его можно найти, отталкиваясь от вероятностных характеристик шумовых составляющих. Однако, многообразие и нестационарность процессов в реальных энергосистемах не позволяет однозначно оценить характеристики всех возможных помех, поэтому предпочтение было отдано экспериментальному подходу.

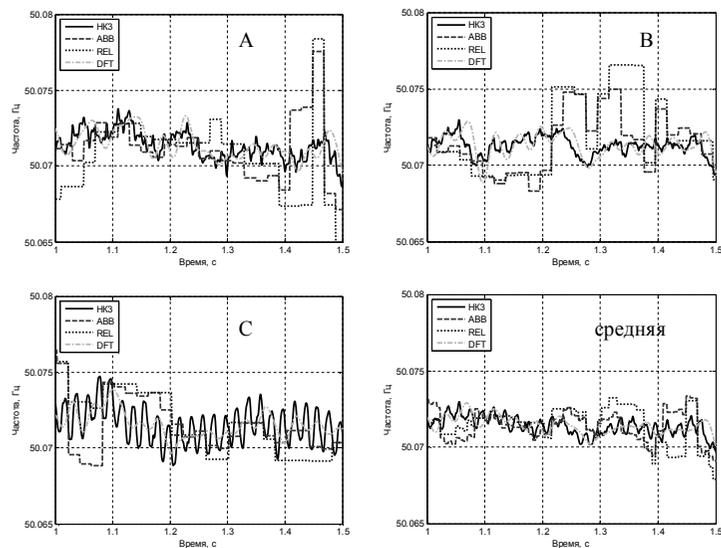


Рис. 3 – Результаты измерения частоты в фазах А, В, С и среднее значение

Анализ результатов показывает, что методы, основанные на выделении моментов пересечения нулевого уровня, уступают методам НКЗ и DFT по точности. Это объясняется тем, что, фактически, из всей информации о сигнале используется только ее небольшая часть, расположенная вблизи нулевого уровня. Вся остальная информация используется только при выполнении фильтрации. Кроме того, кривые изменения частоты, полученные методами НКЗ и DFT для фаз А и В в целом сходны, и, как правило, отличаются незначительно. Это также подтверждает достоверность полученных результатов. Колебательный характер кривой частоты, полученной методом НКЗ по напряжению фазы С может быть объяснен неучтенной шумовой составляющей в исходном сигнале.

Выводы. Таким образом, можно говорить, о том, что современные цифровые методы измерения частоты позволяют получить высокую точность измерения при длительности интервала наблюдения соответствующего трем-четырем периодам основной гармоники входного сигнала. Сокращение интервала наблюдения влечет за собой значительный рост погрешности как следствие более высокой чувствительности к отклонениям формы напряжения от синусоидальной формы. Увеличение интервала наблюдения не приводит к существенному повышению точности измерения. Несмотря на теоретически достижимую погрешность измерения менее 0,001 Гц влияние нелинейности и

нестационарности нагрузки не позволяет гарантированно получить погрешность менее 0,01 Гц. Методы НКЗ и DFT являются предпочтительными. Для повышения точности также может быть использовано усреднение значений частот полученных по трем фазным или линейным напряжениям. Рассмотренные методы измерения частоты могут быть успешно применены как в частотной автоматике энергосистем, так и при выполнении учета качества электрической энергии. В последнем случае необходимо производить усреднение значений, полученных в течение сравнительно больших интервалов времени, что положительно сказывается на результирующей точности и стабильности измерений.

Список литературы: 1. Арцишевский Я.Л. Мониторинг частоты при измерении электрических параметров режима энергосистемы в векторной форме / Арцишевский Я.Л., Журавлев Д.М. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2. С. 63-67. 2. Lopez A. Power System Frequency Measurement Under Nonstationary Situations / Lopez A., Montao J.-C., Castilla M., Gutierrez J., Borrás M.D., Bravo J.C. // IEEE Transactions on Power Delivery – 2008 – vol.23 no.2 – P.562-567. 3. Adanir T. Extremely short term frequency estimation (ESTFE) algorithm for underfrequency protection // International Journal of Electrical Power & Energy Systems - 2007 – vol.29 no.4 P.329-337. 4. Максимов Б.К. Мониторинг частоты в переходных режимах работы электрической сети / Максимов Б.К., Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Журавлев Д.М. // Электричество. 2010. № 04. С. 13-16. 5. Phadke A.G. Synchronized phasor and frequency measurement under transient conditions/ Phadke A.G., Kasztenny B.// IEEE Transactions on Power Delivery – 2009 - vol. 24 no.1 – P.89-95.

Надійшла до редколегії 20.01.2013

УДК 621.316

Измерение частоты промышленной сети как показателя качества электрической энергии / О.Г. Гриб, Р.В. Жданов, Д.А. Гапон, А.А. Зуев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.44-49. Бібліогр.: 5 назв, Іл.:3.

Стаття присвячена питанню вимірювання частоти змінної напруги електричної мережі. Розглянуто результати математичного моделювання різних методів вимірювання на прикладі реального сигналу, отриманого за допомогою цифрового реєстратора. Зроблено висновки про вибір оптимального методу та інтервалу спостереження при аналізі якості електричної енергії.

Ключові слова: енергосистема, якість електроенергії, вимірювання частоти.

The article focuses on the alternating voltage frequency measurement. The results of mathematical modeling of the various measurement methods on real signal obtained with a digital recorder are given. The conclusions about the selection of the optimal method and observation interval when analyzing power quality are made.

Keywords: power system, power quality, frequency measurement.

А.Г. ГУРИН, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХП»;
Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХП»;
О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХП»;
С.Ю. АНТОНЕЦЬ, технолог, ЗАТ «Завод Південкабель», Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛАСТИЧНОСТІ МІДНОГО ПРОВІДНИКА НА НАПРУГУ ПРОБОЮ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬПРОВОДУ

Виконано аналіз результатів контролю відносного видовження при розриві та пробивної напруги емаль дроту з подвійною ізоляцією на основі подвійних сополімерів.

Ключові слова: відносне видовження при розриві, пробивна напруга, емаль дрiт, подвійна ізоляція.

Вступ. Емальдрiт з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів є найбільш сучасним інноваційним продуктом вітчизняного виробництва емальдроту. Забезпечення електричної міцності емальдроту вимагає мінімізації розсіяння значень пробивної напруги $U_{пр}$ (далі для компактності U). Для виробника особливо актуальним є дослідження змінення розсіяння значень U впродовж неперервного технологічного циклу, який на сучасних швидкісних емальагрегатах включає виготовлення багатьох десятків котушок емальдроту.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Випробування на визначення напруги пробою (breakdown voltage) емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів в європейській лабораторії [1] свідчить про те, що однією з основних причин нестабільності U є стан мідного провідника перед емальюванням. Експериментальне дослідження впродовж неперервного технологічного циклу впливу параметрів мідного провідника на статистичні характеристики напруги пробою ізоляції дроту ПЭЭИДХ з двохшаровою ізоляцією на основі поліімідних співполімерів в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм засвідчило [2], що пластичність міді є важливою складовою забезпечення стабільності технологічного процесу емальювання і що пластичність провідника суттєво впливає на величину і стабільність напруги пробою емаль ізоляції.

В [2], на базі математичного апарату інтервальних статистичних моделей (ISM) [3] розроблено статистичний апарат для автоматичного контролю максимальної ймовірності (P_{max}) того, що кількість бездефектних контрольних довжин (100 м) на котушці емальдроту вище

© А.Г. Гурин, Л.А.Щебенюк, О.В.Голик, С.Ю.Антонец, 2013

за визначену технологічну нормативну межу, перевірено можливість його застосування в умовах виробництва.

Ціль досліджень, постановка проблеми. 1) Дослідження впливу пластичності мідного провідника на напругу пробою ізоляції дроту ПЭЭИДХ для найбільш поширеного номінального діаметру 0.63 мм. 2) Перевірка можливості застосування статистичного апарату ISM для автоматичного контролю максимальної ймовірності (P_{max}) виходу параметрів напруги пробою U і відносного видовження при розриві δ за допустимі нормативні границі.

Матеріали досліджень. Визначено напругу пробою U і відносне видовження при розриві δ для 60 котушок дроту ПЭЭИДХ з номінальним діаметром 0.63 мм, виготовлених впродовж неперервного технологічного циклу.

Кореляційні зв'язки напруги пробою U і відносного видовження при розриві δ характеризує таблиця.

Таблиця - Коефіцієнти кореляції $\text{Cor}[X, Y]$ між характеристиками напруги пробою U і відносного видовження при розриві δ для емальдроту діаметром 0.63 мм.

Характеристика X	Характеристика Y		
	Коефіцієнти кореляції $\text{Cor}[X, Y]$		
U - напруга пробою, В	U_{min} , В мінімальна напруга пробою, (для п'яти поточних котушок)	Максимальна ймовірність того, що $U_{min} < 4500$ В, $P_{max}(U)$	
Відносне видовження при розриві δ , %	- 0,154	$\text{Cor}[U_{min}, P_{max}(U)] = 0,451$	
Мінімальне відносне видовження при розриві δ_{min} , % (для 5 поточних котушок)	$\text{Cor}[\delta_{min}, P_{max}(\delta)] = 0,947$	0,947	
			0,780
Максимальна ймовірність того, що $\delta_{min} < 26$ %, $P_{max}(\delta)$			

Ці дані свідчать, що в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам, безпосередня кореляція значень U і δ відсутня: $\text{Cor}[\delta, U] = -0,154$. Одночасно спостерігається майже стопроцентна кореляція між

мінімальною напругою пробою для п'яти поточних котушок U_{\min} і мінімальним відносним видовженням при розриві δ_{\min} для тих самих п'яти поточних котушок: $\text{Kor}[\delta_{\min}, U_{\min}] = 0,947$.

Одержані результати свідчать про те, що в умовах налагодженого технологічного процесу, одним з чинників впливу на величину мінімальної напруги пробою є пластичність мідного провідника і подальше дослідження цього впливу є важливим для забезпечення стабільності технологічного процесу емальювання і напруги пробою емальізоляції.

Оскільки в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам, безпосереднє визначення кількості дефектних об'єктів неможливе, нами використано метод інтервальних статистичних моделей (ИСМ), який в кабельній техніці пройшов успішну апробацію саме у виробництві емальдроту. Цей метод дозволяє оцінити ймовірність виходу параметра за нормативну границю у вигляді контрольні карти максимальної ймовірності P_{\max} .

Контроль виготовлення емальпроводів здійснюють за допомогою вимірювань цілого ряду параметрів, серед яких є такі, що обмежені зверху (не більше α_{\max}), і такі, що обмежені знизу (не менше α_{\min}), в даному разі нами використано алгоритм розрахунку максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу: $P_{\max}\{Y < \alpha_{\min}\}$, придатний для конкретних методик вимірювань параметрів, а саме: пробивної напруги ізоляції емальпроводу U , визначеної для всіх котушок, мінімальної пробивної напруги U_{\min} , визначеної для п'яти поточних котушок, і обмеженої знизу (не менше α_{\min}): $U_{\min} > 4500$ В, максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу, позначеної $P_{\max}(U)$ (рис.1); відносного видовження при розриві δ , для всіх котушок, мінімального видовження при розриві δ_{\min} , визначеного для 5 поточних котушок, і обмеженого знизу (не менше α_{\min}): $\delta_{\min} > 26$ %, максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу, позначеної $P_{\max}(\delta)$ (рис.2).

Контроль виготовлення емальпроводів здійснюється за допомогою вимірювань цілого ряду параметрів. Їх кількість сягає десяти. Тому важливим є об'єднання інформації щодо стабільності технологічного процесу за різними параметрами. Така процедура відсутня і відповідні рішення в практиці приймають інтуїтивно.

Щодо об'єднання інформації про стабільність технологічного процесу, визначену за різними параметрами, то застосування для оцінки ймовірності виходу, наприклад, двох параметрів за нормативну межу, застосування класичної процедури помноження ймовірностей подій, що

перетинаються, в даному разі є неприпустимим: ні за технічним смислом контролю, оскільки, чим більше параметрів контролюють, тим за цією процедурою є менш надійною продукція; ні за виконанням вимоги незалежності параметрів, оскільки дані таблиці 1 свідчать про те, що пробивна напруга ізоляції емальдроту U і відносне видовження при розриві δ не є незалежними параметрами.

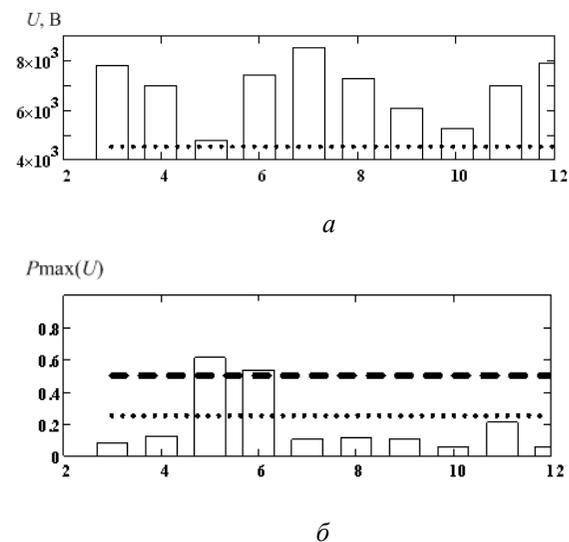


Рис.1 – Результати контролю пробивної напруги ізоляції емальпроводу U : a - мінімальна пробивна напруга U_{\min} , визначена для п'яти поточних котушок і обмежена знизу: $U_{\min} > 4500$ В (пунктир); $б$ - контрольна карта максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну границю $P_{\max}(U)$: рівень $P_{\max}(U) = 0,25$ (пунктир) – це границя статистично підконтрольного рівня стабільності технологічного процесу; рівень $P_{\max}(U) = 0,5$ (штрихова лінія) – це границя достатньої чутливості карти до зростання нестабільності технологічного процесу, перетин якої означає необхідність виявлення причини нестабільності

За високої кореляція між мінімальними значеннями U і δ , якщо значення $P_{\max}(U)$ і $P_{\max}(\delta)$ відрізняються суттєво, то з технічних міркувань рішення слід приймати за більшою максимальною ймовірністю виходу параметра за нормативну границю

$$P_{\max}(U, \delta) = \sup \{ P_{\max}(U), P_{\max}(\delta) \}. \quad (1)$$

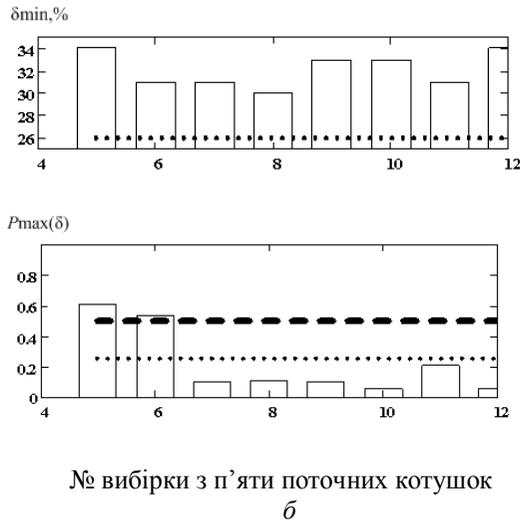


Рис.2 – Результати контролю відносного видовження при розриві δ : a – мінімальне значення δ_{\min} , визначене для п'яти поточних котушок і обмежене знизу: $\delta_{\min} > 26\%$ (пунктир); b – контрольна карта максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну границю $P_{\max}(\delta)$

На рис.3 наведена оцінка $P_{\max}(U, \delta)$ за (1), яка адекватно описує стабільність технологічного процесу для котушок емальдроту від №30 до №60 (№№ вибірок 7 – 12). Для перших двох вибірок (№№ вибірок 6 -7) значення $P_{\max}(U)$ і $P_{\max}(\delta)$ відрізняються мало. В такий період технологічного контролю перевагу слід віддати значенню P_{\max} , яке є більш чутливим до зменшення стабільності технологічного процесу.

Взагалі P_{\max} - функція двох змінних [4]

$$P_{\max} = M_{\max}^2 / (M_{\max}^2 + \alpha^2), \quad (2)$$

де M_{\max} - верхнє середнє параметра, який контролюють, в даному разі найбільше відхилення контрольного параметру від середнього значення в поточній вибірці; α - гранично допустиме відхилення контрольного параметру від середнього значення в поточній вибірці.

Якщо гранично допустиме відхилення α параметру від середнього значення є сталою величиною, то характеристикою чутливості функції до зменшення стабільності технологічного процесу є її похідна по M_{\max} :

$$dP_{\max} / dM_{\max} = 2M_{\max} \cdot \alpha^2 / (M_{\max}^2 + \alpha^2)^2, \quad (3)$$

де M_{\max} - найбільше відхилення контрольного параметру від середнього значення в поточній вибірці; α - найменше відхилення контрольного

параметру від гранично допустимого мінімального значення за контрольний технологічний цикл.

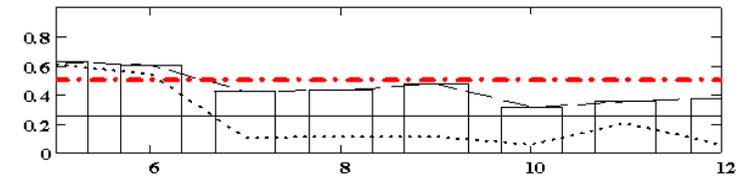


Рис.3 – Результати контролю стабільності технологічного процесу виготовлення емальдроту за допомогою вимірювання двох параметрів: U_{\min} , ($U_{\min} > 4500$ В) і δ_{\min} , ($\delta_{\min} > 26\%$)

На рис.3 наведені графіки залежностей похідної за (3) від відношення M_{\max} / α , для двох параметрів емальдроту, - напруги пробою емаль ізоляції і відносного видовження при розриві: $dP_{\max}(U) / dM_{\max}(U) = f(M_{\max}(U) / \alpha U)$ і $dP_{\max}(\delta) / dM_{\max}(\delta) = f(M_{\max}(\delta) / \alpha \delta)$.

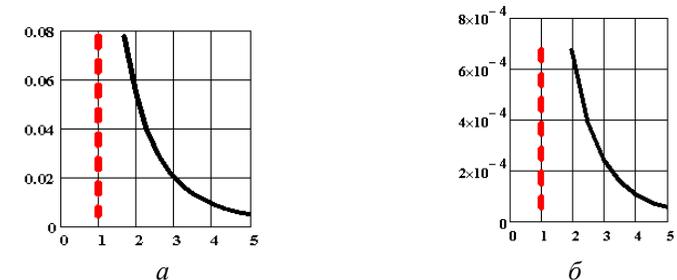


Рис.4 – Залежності dP_{\max} по dM_{\max} за (3) від відношення M_{\max} / α для двох параметрів емаль дроту: a - напруги пробою емаль ізоляції і b - відносного видовження при розриві .

Співставлення похідних на рис.4 свідчить про те, що більш чутливим до зменшення стабільності технологічного процесу є параметр δ , отже (1) є застосовним до всіх одержаних результатів, що ілюструє рис.3.

Цей рисунок ілюструє закономірність, за якою при наближенні до граничної різниці ($M_{\max} / \alpha = 1$) похідна збільшується, відповідні графіки є свідченням адекватності прийнятого алгоритму розрахунку P_{\max} . Але значення похідних і кінетика їх зростання при наближенні до $M_{\max} / \alpha = 1$ свідчать в даному разі на користь застосування (1).

Результати досліджень. 1. В умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним

нормативам, важливим чинником впливу на величину мінімальної напруги пробною емальзізоляції є пластичність мідного провідника.

2. Перевірена можливість застосування контрольної карти максимальної ймовірності виходу двох параметрів за відповідні нормативні границі, яка фіксує більше значення з двох визначених.

Список літератури: 1. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – р.18. 2. *Щебенюк Л.А.* Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емаль провідів. / *Л.А. Щебенюк, С.Ю. Антоненць* // Вістник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 23. – С.166 – 169. 3. *Щебенюк Л.А.* Оптимальные параметры статистического контроля технологических процессов, основанного на применении интервальных статистических моделей / *Л.А. Щебенюк* // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 127 – С. 77–82. 4. *Щебенюк Л.А.* Контрольна карта – інструмент контролю якості кабельної продукції / *Л.А. Щебенюк* // Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / *В.П.Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антоненць, О.А. Науменко* – Х.: Регіон-інформ, 2000.– С. 235–269.

Поступила в редколлегию 23. 02 .2013

УДК 621.315.2

Дослідження впливу пластичності мідного провідника на напругу пробною ізоляції емальпроводу / Гурін А.Г., Щебенюк Л.А., Голик О.В., Антоненць С.Ю. // Вістник НТУ «ХП». Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», – 2013. – №.17 (990).– С.57-64. Бібліогр.: 4 назв. Іл.: 4. Табл.:1.

Выполнен анализ результатов контроля относительного удлинения при разрыве и напряжения пробоя эмальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров.

Ключевые слова: относительное удлинение при разрыве, эмальпровод, пробивное напряжение, двойная изоляция.

The analysis of datas of monitoring of the technological standard parameters of in enameled wire insulated articles.

Keywords: relative lengthening at a break, enameled wire, aggressive voltage, double isolation.

УДК 55.1+621.9.044.4

А.Г. ГУРИН, д-р.техн.наук, професор, зав. каф. ЕІКТ НТУ "ХП";
О.В. БОНДАРЕНКО, ас. НТУ "ХП";
О.ШВИДКИЙ, асп. НТУ "ХП"

МЕТОД ОЦІНКИ МЕХАНІЧНОГО ЗНОШУВАННЯ ТА РЕСУРСУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ГЕОФІЗИЧНОГО ПЕРЕСУВНОГО ОБЛАДНАННЯ

Розглянуті причини зношування кабельних ліній геофізичного свердловинного обладнання та силових кабельних ліній поверхневих випромінювачів сейсмоакустичних імпульсів при сейсморозвідці і інтенсифікації видобутку нафти електрофізичними пристроями.

Ключові слова: кабельна лінія, механічна міцність, електричне геофізичне обладнання.

1. Актуальність задачі

При різноманітних геофізичних дослідженнях широко застосовуються навантажені кабелі. За допомогою цих кабелів здійснюється пересування в свердловині апаратури, подача електричного струму та передача інформації до поверхневої апаратури. Також такі кабелі використовуються для поверхневих кабельних ліній. Для нормального функціонування апаратури, що спускається до свердловини та працює на поверхні при розвідці корисних копалин, необхідні геофізичні кабелі з високою надійністю експлуатації, бо умови роботи таких кабелів є досить жорсткими, і, зазвичай, вони мають декілька шарів захисного дроту. Найбільш розповсюдженими дефектами кабельних ліній є: механічне зношення – зношення захисного шару кабелю внаслідок механічного тертя; пластичне зношення – деформація захисного шару кабелю внаслідок дії сил, що перевищують допустимі значення; корозія – фізико-хімічне зношення захисного; руйнування від перевищення допустимих осьових навантажень; руйнування від зовнішніх випадкових факторів, та інш. Найбільш шкідливими дефектами є механічне і пластичне зношення, та руйнування від зовнішніх випадкових факторів. Аналіз сучасної літератури виявив відсутність комплексного системного підходу до оцінки довговічності вказаних кабелів, а окремі автори звертаються лише до деяких одиничних аспектів міцності, зазвичай не враховуючи інтегральний вплив факторів руйнування. Тому на сьогоднішній день існує потреба в розробці комплексної методики багатофакторного оцінювання ресурсу вже існуючих геофізичних кабелів, а також розробити алгоритм розрахунку кабелів з властивостями та характеристиками, які б задовольняли жорстким умовам роботи.

© А.Г. Гурін, О.В.Бондаренко, О. Швидкий, 2013

Таким чином, розробка комплексної методики оцінки та вибору занурювальних та поверхневих геофізичних кабельних ліній є актуальною задачею.

2. Блок-схема електрофізичного комплексу з поверхневими та свердловинними випромінювачами

Загальна блок-схема сейсмоакустичного комплексу представлена на рис. 1 [1].

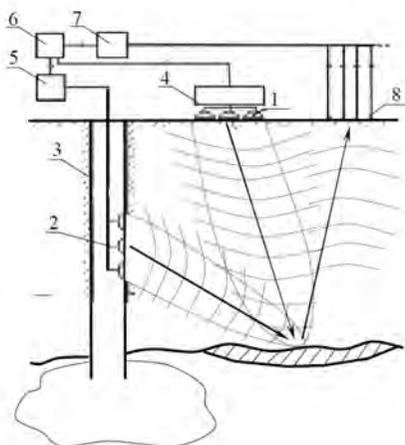


Рис. 1 - Схема пошуку нафтяних та газових горизонтів

На рис. 1 прийняті наступні позначення: 1 – колектор свердловини; 2 – свердловинні випромінювачі; 3 – обсадна колона; 4 – поверхневі випромінювачі; 5 – генератори імпульсів струму; 6 – джерело електроенергії; 7 – сеймостанція; 8 – сеймоприймач.

Комплекс включає в своєму складі розподілену по поверхні землі антенну групу випромінювачів 1, здатних створювати сейсмоакустичні імпульси направленої дії високої потужності. При вивченні складу шарів ґрунтів навколо колектора глибокої свердловини, відбитий від нафтового шару акустичний сигнал згасає, тому у свердловині 3 розміщують випромінюючу антену 2 з декількома свердловинними випромінювачами, яка також має направлену дію. Підсилений свердловинними випромінювачами, відбитий від нафтового шару сигнал дає більш чітку картину запасів нафти в районі свердловини.

Свердловинні та поверхневі випромінювачі, наприклад, електродинамічного типу, випромінюють акустичний імпульс при подачі

імпульсів струму від генераторів 4 і 5, які живляться від джерела електроенергії 6.

Відбитий корисний сигнал приймають за допомогою сеймостанції 7 від сеймоприймачів 8. Необхідність спуску-підйому свердловинних випромінювачів та вплив коливань кабельної лінії у свердловині призводять до прискореного зношення захисних оболонок кабелю та зменшення часу його експлуатації.

3. Методика та підхід вирішення задачі

Розрахункова модель геофізичних кабельних ліній для розміщення випромінювача акустичних імпульсів у зоні колектора глибокої нафтяної свердловини.

Одним з найважливіших елементів представленої схеми є геофізичний кабель [2]. Він складається з декількох елементів, основними елементами є: жили, що проводять електричний струм, ізоляція та броня. Типові конструкції геофізичних кабелів, що застосовуються у глибоких свердловинах представлені на рис. 2 (на рисунку прийняті наступні позначення: 1 – струмопровідна жила; 2 – ізоляція; 3 – оболонка; 4 – обмотка; 5 – зовнішній провідник; 6 – броня). Відомо, що ізоляція при експлуатації кабелів піддається механічним навантаженням, дії бурового розчину, а броня – дії механічних, в першу чергу, навантажень тертя. Відомо також, що струмопровідні жили гарно захищені ізоляцією та бронею, і ресурс жил значно перевищує ресурс броні та ізоляції.

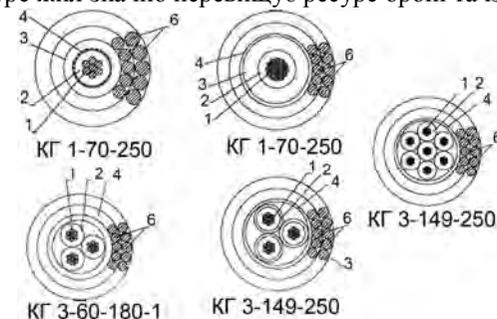


Рис. 2 – Типові конструкції геофізичних кабелів: 1 – струмопровід, 2 – ізоляція, 3 – броня, 4 – оболонка, 5 – обмотка, облєтєння, 6 – броня

Ресурс кабелю може бути розрахований за наступною залежністю

$$N = \frac{\pi d_2^2 \gamma m_2}{8Y}, \quad (1)$$

де d_2 – діаметр дроту броні зовнішньої оболонки; n_2 – кількість дроту броні зовнішньої оболонки; γ – щільність матеріалу дроту броні; Y – загальне зношення дроту броні зовнішньої оболонки (отримується шляхом апроксимації даних, отриманих при проведенні відповідних експериментів).

Якщо ресурс вимірюється в кілометрах, то

$$Q = 2NL, \quad (2)$$

де L – глибина свердловини.

Сила притискання кабелю до стінки свердловини визначається за формулою

$$P = \frac{2T + qR\varphi}{2R - R\varphi f}, \quad (3)$$

де T – сила, що діє на відрізок кабелю на ділянці свердловини; q – вага 1 см кабелю; R – радіус кривизни свердловини; φ – кут, в якому замкнена ділянка свердловини; f – коефіцієнт тертя кабелю о стінку свердловини.

Сила натягу (T) при підйманні кабелю з свердловини розраховується за формулою, що має наступний вигляд

$$T = Z \left[\frac{\pi^2(\gamma - \rho)}{2} \left(Rd_1 + Rd_2 + d_1d_2 + \frac{d_1^2}{2} + \frac{d_2^2}{2} \right) + \pi R^2 \rho \right] + \\ + Z \left[\frac{a(R + d_1 + d_2)^2}{(R + 2.4)^2} + \frac{m(R + d_1 + d_2)}{(R + 2.4)} + p \right] + \\ + Z \left[(\pi R^2 - 1.8)(\gamma_u - \rho) + 1.8(8.3 - \rho) \right] + \frac{100(7.8 - \rho)}{7.8}, \quad (4)$$

де γ_u – щільність матеріалу ізоляції; ρ – щільність бурового розчину свердловини; a – параметр, що враховує вплив зміни температури в свердловини; m – параметр, що враховує вплив тертя поверхні по стінці свердловини та буровий розчин; Z – довжина кабелю, що підвішений до ділянки, яка розглядається; p – параметр, що враховує вплив набрякання ізоляції під дією рідини та газів в свердловини.

Сила натягу кабелю дозволяє оцінити його міцність на розрив в осьовому напрямку.

Стосовно зношення дроту броні зовнішньої оболонки автори даної статті пропонують дещо інший підхід, бо запропонована у вказаній методиці апроксимації даних експериментів не є досконалою. Результати

експерименту можуть сильно варіювати в залежності від умов його проведення. Тому запропоновано зношення броні розраховувати аналітично.

Модель розрахунку представимо наступним чином. Кожну шорсткість на стінці свердловини представимо у вигляді сферичного індентора [3], з тим допущенням, що він є абсолютно жорсткий, а поверхня дроту броні є пружним однорідним півпростором. Розглянемо одиничний елемент шорсткості стінки свердловини, який втискається у поверхню дроту броні.

Схема втискання індентору в пружний півпростір зображена на рис. 3.

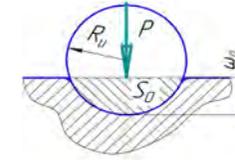


Рис. 3 - Схема втискання індентору

На рисунку 3 прийняті наступні позначення: R_u – радіус кривизни індентора; P – сила втискання індентора; ω_0 – глибина втискання індентора під дією сили P ; S_0 – площа, яку займає індентор в півпросторі.

Глибина проникнення індентора в однорідний півпростір згідно з розраховується за формулою 5

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{9\pi^2 \beta_1 k_1 P}{8}}. \quad (5)$$

Коефіцієнти, що входять до (5) обчислюються за формулами:

$$\beta_1 = \frac{1}{2R}; \quad k_1 = \frac{1 - \mu}{\pi E}, \quad (6)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу півпростору; E – модуль пружності матеріалу півпростору.

Для визначення ресурсу запропоновано ввести допущення при осьовому переміщенні кабелю (тертя): індентор зрізує шар матеріалу товщиною рівною глибині його проникнення, що зображено на рис.4.

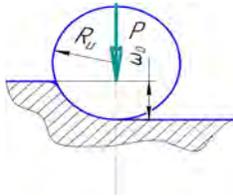


Рис. 4 - Схема втискання індентору

Для визначення ресурсу, розглянемо схематичний перетин кабелю, у якому шар дротової броні замінений еквівалентним шаром, що являє собою однорідну оболонку (рис. 5).

Таким чином, еквівалентна площа перетину ($S_{\text{екв}}$), вказаного шару, буде дорівнювати сумі площ перетинів дротів броні

$$S_{\text{екв}} = n_1 S_1 + n_2 S_2, \quad (7)$$

де n_1 , n_2 , S_1 , S_2 – відповідно кількість дроту та площа одного дроту броні внутрішньої (1) та зовнішньої (2) оболонки.

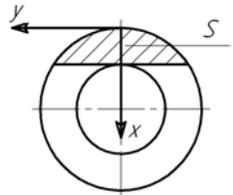


Рис. 5 - Схематичний перетин кабелю

Будемо розглядати крайній випадок, коли кабель піддається впливу тертя тільки з одного боку. Механічне зношення буде здійснюватися тільки в одному напрямку до тих пір, поки товщина шару броні не стане критично малою, що обмежується характеристиками міцності кабелю в осьовому напрямку.

Тоді, розглядаючи перетин кабелю, можемо вказати на деяку допустиму площу (S), яка може бути стерта з броні кабелю (рис. 5).

Далі при співставленні допустимої площі (S) та площі одноразового втискання індентора, знайдемо кількість (N_u) допустимих втискань останнього

$$N_u = \frac{S}{S_0}. \quad (8)$$

При відомому значення N_u , а також можливості представлення шорсткості стінки свердловини у вигляді деякої функції (наприклад, синусоїдою), і знаючи середню швидкість проходження кабелю у свердловині, представимо ресурс у годинах як

$$N_t = F(N_u), \quad (9)$$

де F – функція, що представляє інтегральний вплив шорсткості стінки свердловини та середньої швидкості проходження кабелю у свердловині.

Слід зазначити, що точність розрахунків покращується, якщо розглядати півпростір неоднорідним (наближено до реалі). В такому випадку дослідники повинні визначити модуль пружності, що є актуальним для деякої зони контакту. Проводиться експеримент, шляхом втискання індентора у відріз реального кабелю, за вихідними даними якого розраховується модуль пружності

$$E_n = \frac{3P}{4a\omega_0(1-\mu^2)}, \quad (10)$$

де a – радіус зони контакту.

Даний підхід дозволяє проводити оцінку кабелю на різних часових етапах його роботи, що врахує такі фактори як старіння матеріалу, розпушування струмопровідних жил та дротів броні та інш. Це дасть можливість не тільки аналізувати стан кабелю, а і робити прогнози щодо його подальшої роботи.

Розрахункова модель геофізичних поверхневих кабельних ліній.

Кабельні лінії для підводу електричної енергії до випромінювачів [4], що розташовуються на поверхні землі, зазвичай роблять на базі коаксіальних радіочастотних кабелів типу РК чи малопродуктивних кабелів КВІМ. Стійкість до механічного зношення оболонки та її руйнування вказаних вище кабелів недостатня для покладених задач, тому ці кабелі потребують додаткового механічного захисту. Кабелі розміщують в шлангу чи покритті з вакуумної гуми (шляхом екструзування), або встановлюють на спеціальних ізоляторах.

Поверхневі кабельні лінії піддаються впливу тих самих негативних факторів, що і занурювані, а саме, в першу чергу, тертя та ударів. Розрахункова модель обчислення ресурсу при терті кабелю по поверхні ґрунту аналогічна розглянутій у попередньому розділі (5-9). Винятком можуть стати лише деякі конструктивні особливості поверхневих кабельних ліній, а саме: зовнішня оболонка таких кабелів зроблена з гумових матеріалів. Це впливає певним чином на обчислення ресурсу (7).

Модель удару запропоновано розглядати теж як занурення індентору у півпростір, але з значно більшою силою, з послідовним виносом

матеріалу поверхневого шару кабелю. Удари, в свою чергу, призводять до зміни структури кабелю, що обумовлює, так зване, розпушення його жил. Тим самим змінюється пружність кабелю, яку можна врахувати у розрахунках ресурсу шляхом визначення модуль пружності, що є актуальним для деякої зони контакту (10).

Висновки. 1. Представлена схема сейсмоакустичного комплексу та основні проблемні питання, що пов'язані з функціонуванням кабельних ліній у ній. 2. Надана розрахункова модель геофізичних кабельних ліній для розміщення випромінювача акустичних імпульсів у зоні колектора глибокої нафтяної свердловини. 3. Надана розрахункова модель геофізичних поверхневих кабельних ліній.

Список літератури: 1. *Гурин А.Г.* Сквжинный электродинамический излучатель гидроакустических импульсов взрывного типа / *А.Г. Гурин, С.П. Мостовой, Ю.Г. Гонтарь, О.Н. Ермак* // Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут" : збірник наукових праць : тематичний випуск "Енергетика: надійність та ефективність". – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – №23. – С. 84–91. 2. *Белорусов Н.И.* Электрические кабели, провода и шнуры : Справочник. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 536 с. 3. *Александров А.В.* Основы теории упругости и пластичности. - М. : Высш. шк., 1990. – 400 с. 4. *Горденев И.И.* Коаксиальные кабели связи. - М. : Радио и связь, 1983. – 209 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2013

УДК 55.1+621.9.044.4

Метод оцінки механічного зношування та ресурсу кабельних ліній геофізичного пересувного обладнання / Гурин А.Г., Бондаренко А.В., Швидкий О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – 2013. - №17 (990). - С.57-64. Бібліогр.: 4 назв. Іл.: 5.

Рассмотрены причины износа кабельных линий геофизического скважинного оборудования и силовых кабельных линий поверхностных источников сейсмоакустических импульсов при сейсморазведке и интенсификации добычи нефти электрофизическими установками.

Ключевые слова: кабельная линия, механическая прочность, электрическое геофизическое оборудование.

The reasons of deterioration of cable lines of geophysical equipment in boreholes and power cable lines of superficial at seismic prospecting and an intensification of an oil recovery by electrophysical installations were considered.

Keywords: cable lines, mechanical deterioration, geophysical electrophysical equipment.

УДК 621.316.

А.А.ДИКАНЬ, магистрант, НТУ «ХПІ»;
Ю.В.ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Указаны цели и задачи компенсации реактивной мощности, приведены рекомендации по выбору параметров регулирования реактивной мощности, рассмотрены виды устройств автоматической компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: компенсация, реактивная мощность, автоматическое регулирование.

Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях, одним из основных и наиболее эффективным мероприятием которого является компенсация реактивной мощности (КРМ), – важная составляющая общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Однако снижение потерь является не самоцелью, а одним из аспектов более общей проблемы повышения экономичности работы энергосистемы в целом.

Системы и устройства КРМ являются также важным фактором повышения надежности энергосистем. Применение же автоматического управления КРМ дает возможность эффективно регулировать режим работы электрических сетей любого назначения. Выбор параметра, по которому происходит автоматическое регулирование устройств КРМ, осуществляется в зависимости от целей и условий компенсации. КРМ необходима на всех уровнях напряжения как в сетях потребителей, так и в сетях энергосистем [1].

Применение различных управляемых устройств КРМ дает возможность максимально использовать в режимах с повышенной пропускной способностью линии электропередачи, а также обеспечивать баланс реактивных мощностей (РМ) в отдельных узлах нагрузки и таким образом обеспечить поддержание заданных уровней напряжения в них [1].

Учитывая высокую стоимость строительства высоковольтных линий электропередачи, возрастает актуальность максимального их использования путем повышения пропускной способности за счет применения новых технических средств автоматической КРМ. В частности, для протяженных линий, где превалирует емкостная составляющая реактивного сопротивления, вследствие чего такие линии рассматриваются как источники отрицательной реактивной мощности [2], зарядную мощность линии компенсируют шунтирующими реакторами (ШР).

© А.А.Дикань, Ю.В.Владимиров, 2013

Переход от нерегулируемых ШР к управляемым ШР, а далее к статическим тиристорным компенсаторам (СТК) дает возможность существенно увеличить передаваемую по линии мощность [1].

Автоматическое регулирование позволяет отслеживать изменение реактивной мощности нагрузки в компенсируемой сети и, в соответствии с заданным, корректировать значение коэффициента мощности – $\cos\phi$ [3]. При этом у трансформаторов и линий вследствие уменьшения реактивной нагрузки возрастает пропускная способность по активной мощности. Уменьшение же полного тока позволяет снизить сечение проводов и кабелей, уменьшить номинальную мощность трансформаторов и таким образом уменьшить капитальные затраты на электрические сети.

В сетях потребителей для КРМ используются по большей части батареи конденсаторов (БК). Регулирование РМ БК может вестись только ступенями путем деления батарей на части. Чем больше число таких ступеней, тем более точное регулирование, но тем больше затраты на установку коммутирующей и защитной аппаратуры. Для устранения переходных процессов при коммутации БК, которые отрицательно влияют на срок службы, как коммутационной аппаратуры, так и самих конденсаторов, вместо выключателей можно использовать тиристорные ключи, которые позволяют включать конденсаторы в тот момент, когда мгновенное напряжение на них равно напряжению сети, и отключать их, когда мгновенное значение тока в конденсаторах равно нулю [4].

При достаточно стабильных графиках нагрузки по РМ или необходимости выполнения предписаний энергоснабжающей организации по генерации (потреблению) заданного уровня РМ в определенное время суток может применяться простейший вид автоматического регулирования – «по времени суток».

Автоматическое регулирование по величине и знаку РМ целесообразно вести в том случае, если энергосистема обеспечивает соответствующие уровни напряжения на вводе потребителя, а потребителю из экономических или других соображений необходимо обеспечивать полную КРМ или поддерживать РМ на заданном уровне с максимальной точностью.

Регулирование по уровню напряжения применяется, как правило, вместе с регулированием по другим критериям и при необходимости поддержания постоянства напряжения с допустимыми отклонениями в узле.

При резко переменном графике нагрузки по мощности и заведомо известном характере реактивности регулирование можно производить по уровню тока нагрузки или в сочетании с другими параметрами [5].

Расчеты проведенные авторами данной статьи, с точки зрения целесообразной точности регулирования, показали, что нет необходимости в особой точности регулирования. Поскольку, например, при поддержании коэффициента реактивной мощности $\tan\phi$ в диапазоне от 0,25 до 0,4 дополнительные потери в сетях изменяются всего только в пределах от 6% до 14% от полных суммарных потерь.

Выводы. 1. Автоматическое регулирование позволяет эффективно управлять компенсацией реактивной мощности и режимами работы сети.

2. Правильный выбор устройств КРМ и параметров регулирования зависит от конкретных условий и целей.

3. Нет необходимости в особой точности регулирования.

Список литературы: 1. Новости Электротехники 2(45). Реактивная мощность в электрических сетях Технологии управляемой компенсации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/45/08.php>. 2. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А. В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с. 3. Конденсаторный завод "Ньюкон" Реактивная мощность, способы и виды (средства) компенсации реактивной мощности [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nucon.ru/reactive-power/reactive-power-and-types-of-compensation.php>. 4. Электрические сети Компенсация реактивных мощностей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://leg.co.ua/stati/podstancii/kompensaciya-reaktivnyh-moschnostey.html>. 5. "Силкон-Квар" Как выбрать компенсирующее устройство [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.silcon-kvar.com.ua/vibor_ku.htm

Поступила в редколлегию 14.03.2013

УДК 621.316.

Автоматическое управление компенсацией реактивной мощности / Дикань А.А., Владимир Ю.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С. 65-67. Бібліогр.: 5 назв.

Вказано цілі та задачі компенсації реактивної потужності, приведено рекомендації щодо вибору параметрів регулювання реактивної потужності, розглянуто види пристроїв автоматичної компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: компенсація, реактивна потужність, автоматичне регулювання.

These have power factor correction, provides guidelines on the choice of parameters reactive power control are considered types of automatic reactive power compensation.

Keywords: compensation, reactive power, automatic control.

В. М. ЗОЛОТАРЕВ, д-р техн. наук, ген. дир. ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

В. Л. ЧУЛЕЕВ, вед. инж. НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

Е. В. ЧУЛЕЕВА, канд. техн. наук, вед. инж. НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

Л. Г. ВАСИЛЕЦ, канд. техн. наук, директор НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ И КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению структурно-чувствительного параметра и константы скорости старения полимерных композиций на основе поливинилхлорида для изоляции кабельно-проводниковой продукции.

Ключевые слова: поливинилхлорид (ПВХ), структурно-чувствительный параметр, константа скорости старения, изоляция, кабельно-проводниковая продукция

Поливинилхлорид (ПВХ) является одним из наиболее известных многотоннажных и практически важных полимерных продуктов, на основе которого получают полумягкие и мягкие (пластифицированные) полимерные композиции, используемые в производстве кабелей и проводов. Основной проблемой ПВХ является его весьма низкая стабильность. Под действием тепла, УФ-света, кислорода, излучений и др. он легко распадается по закону превращения обрамляющих групп с элиминированием хлористого водорода и образованием последовательностей двойных ненасыщенных $C=C$ связей в макромолекулах с появлением нежелательной окраски (от желтой до черной) [1]. Поэтому при хранении, переработке и эксплуатации ПВХ, а также при получении, хранении и использовании полимерных композиций и кабельно-проводниковой продукции (КПП) на его основе необходимо применять совокупность методов, приводящих к повышению устойчивости ПВХ к действию различных факторов, к его стабилизации. В настоящий момент конъюнктура рынка стабилизаторов складывается таким образом, что использование $Ca-Zn$ стабилизаторов является все более экономически и экологически оправданным.

В [2] показано эффективность использования комплексных стабилизаторов и влияние солей жирных кислот Ca , Zn на теплотехнические и эксплуатационные характеристики полимерных композиций на основе ПВХ для изоляции КПП.

В предложенных комплексных системах подавление деструкции ПВХ при переработке и предотвращение деструкции в течение срока службы полученного материала – это функции системы стабилизации, которые обеспечиваются наличием $Ca-Zn$ стабилизаторов и антиоксидантов.

Целью настоящей работы является изучение процесса старения изоляции для кабельно-проводниковой продукции с использованием непрямых методов испытаний на надежность, основанными на физическом прогнозировании.

При проведении исследований использовали ПВХ композиции, изготовленные на базе суспензионных ПВХ смол следующих марок: – S-PVC OXYVINIL 240, США; – KSF-70 Карпатнефтехим, Украина; – S-70-PVC-S Polanvinil, Польша. В состав композиции входят: пластификатор (диоктилфталат), стабилизаторы (соли жирных кислот Ca и Zn), антиоксидант, технологическая добавка.

Полимерные композиции изготавливались смешением исходных компонентов в лабораторном смесителе. Полученную смесь вальцевали на лабораторных вальцах. Промышленные партии изготавливались на линии компаундирования ПВХ пластикаторов фирмы REPKON.

Оценку надежности проводили по состоянию изоляции, определенному по показателю относительного удлинения при разрыве (l , %). Определение относительного удлинения до и после старения образцов полимерных композиций проводили в соответствии с ДСТУ ІЕС 60811-1-1:2004 [3].

Предел текучести расплава (ПТР) определяли на приборе ИИРТ-АМ при температуре 170 °С и нагрузке 100 Н по ГОСТ 11645-65 [4].

При испытаниях на надежность материала изоляции из ПВХ пластика оценку проводили по структурно-чувствительному показателю ΔG . Определение показателя ΔG проводили методом TGA на приборе $TGA/DSC 1/1000 SF$ фирмы METTLER TOLEDO.

Определяли величины показателя ΔG в начальном состоянии (ΔG_0) и после изотермической выдержки (ΔG_j) ПВХ пластикаторов.

От каждого образца изоляции отбирали три пробы, каждая из которых имела массу от 10 мг до 20 мг. Отобранную пробу помещали в керамический тигель прибора $TGA/DSC 1/1100 SF$. Запускали, ранее составленную, температурную программу прибора: нагрев от 25 °С до 350 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин и выдержка образца при температуре 350 °С – 20 мин.

Обработка кривой была проведена программой «Mathematics» прибора TGA/DSC 1/1000 SF с выводом на экран монитора конечных результатов измерения величины показателя ΔG_0 (рис. 1).

По результатам проведенных испытаний делали оценку достаточности испытанных проб.

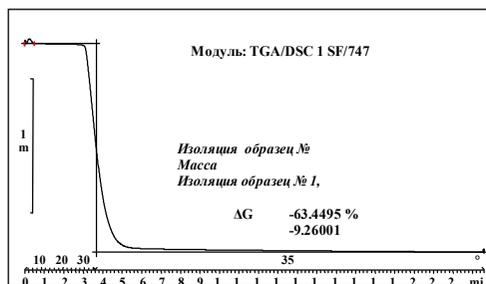


Рис. 1 – Кривая результата измерения величины показателя ΔG

Необходимое для испытаний количество проб (n) должно удовлетворять соотношению

$$n \geq \frac{t_{\alpha}^2 \cdot V_x^2}{\gamma} \quad (1)$$

где t_{α} – квантиль Стьюдента для достоверности α и числа степеней свободы $n - 2$; γ – предельная относительная погрешность измерения (рекомендуется принимать равной 0,02); V_x – коэффициент вариации для результатов измерения;

$$V_x = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (2)$$

где σ – статистическая оценка среднеквадратичного отклонения; \bar{v} – статистическая оценка математического ожидания результатов измерения (среднее значение);

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{z=1}^n (v_z - \bar{v})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

где v_z – результат измерения величины ΔG z -ой пробы ($z=1,2,\dots,n$); \bar{v} – статистическая оценка математического ожидания результатов измерения (среднее значение); n – количество проб.

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n v_z \quad (4)$$

где v_z – результат измерения величины ΔG z -ой пробы ($z = 1,2,\dots,n$); n – количество проб.

Значение квантиля Стьюдента выбирали для достоверности 0,95.

Каждую группу отобранных образцов подвергали изотермической выдержке в одном из трех тепловых режимов.

Температуры тепловых режимов устанавливали отличными не менее, чем на пять градусов одна от другой, при этом максимальная температура испытаний была такой, что на протяжении испытаний не происходило дегидрохлорирования поливинилхлорида.

Изотермическую выдержку образцов проводили циклами, количество циклов выдержки – четыре. Длительность каждого цикла устанавливали в зависимости от температуры, чем выше температура, тем меньше длительность, но не менее 24 часа.

Длительности циклов изотермической выдержки приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Длительности циклов изотермической выдержки

Тип материала	Длительность выдержки τ , ч, при температуре, °C		
	90	110	130
Изоляция (ПВХ пластикат)	300	150	25
	600	225	50
	900	300	75
	1200	375	100

Константу скорости старения при каждой температуре рассчитывали методом наименьших квадратов по формуле [5]

$$K_j = \frac{1}{3600} \cdot \frac{\sum_{j=1}^h (\tau_j - \bar{\tau})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (\tau_j - \bar{\tau})^2} \quad (5)$$

где K_j – константа скорости старения при температуре T_j , $с^{-1}$; τ_j – длительность изотермической выдержки от начала испытаний до окончания j -го цикла из ($j=1,2,3,\dots,h$); $\bar{\tau}$ – длительность изотермической выдержки (среднее значение);

$$\bar{\tau} = \sum_{j=1}^h \frac{\tau_j}{n} \quad (6)$$

где τ_j – длительность изотермической выдержки от начала испытаний до окончания j -го цикла из ($j=1,2,3,\dots,h$); n – количество проб;

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_j}{n}, \quad (7)$$

Для материала изоляции из ПВХ пластика

$$y_j = \left(\ln \frac{G_0 + a\Delta G_0 - b}{G_0 + a\Delta G_j - b} \right)^{1,6}, \quad (8)$$

где G_0 , a , b – эмпирические коэффициенты (соответственно 110,5; 4,50; 270,0); ΔG_j – статистическая оценка математического ожидания результатов измерения показателя ΔG на пробах снятых с образцов после изотермической выдержки в течение τ_j .

$$\Delta G_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta G_j, \quad (9)$$

где ΔG_j – статистическая оценка математического ожидания результатов измерения показателя ΔG на пробах, которые отобраны от образцов после изотермической выдержки в течение τ_j ; n – количество проб.

Данные экспериментальных исследований обрабатывались при помощи стандартной компьютерной программы Microsoft Excel.

Графические зависимости строили при помощи программы Graf 3D.

Результаты экспериментальных данных и расчета константы скорости старения для композиций изоляции на основе ПВХ пластиков приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных данных и расчета константы скорости старения

№ композиции изоляции	Константа скорости старения К, при температуре, °С		
	90	110	130
1 (ПВХ смола США)	$9,1 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
2 (ПВХ смола Калуш)	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$
3 (ПВХ смола Польша)	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-9}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$
4 (ПВХ смола СШАx1,5CaSt)	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$
5 (ПВХ смола СШАx1,25CaSt)	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$

Одновременно проводили исследования по изменению относительного удлинения при разрыве в процессе старения изоляционных материалов.

Для каждого материала изоляции строили зависимость между относительным удлинением и значением показателя ΔG .

Гранично-допустимые значения показателя ΔG определяли по корреляционной зависимости от относительного удлинения при разрыве l .

Корреляционные зависимости эксплуатационного параметра – относительного удлинения при разрыве (l) были получены на образцах, изготовленных с применением ПВХ смолы разных производителей.

Результаты представлены на рис. 1 (а, б, в).

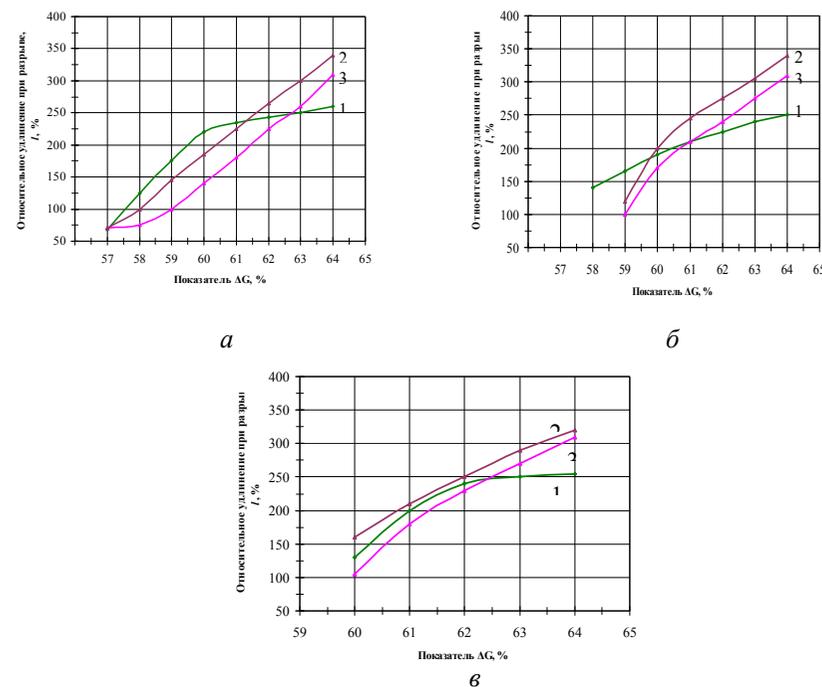


Рис. 2 – Зависимость относительного удлинения при разрыве от показателя ΔG : а – композиций 1, 2, 3 при температуре 130 °С; б – композиций 1, 2, 3 при температуре 110 °С; в – композиций 1, 2, 3 при температуре 90 °С

Из данных исследований видно, что изоляционные композиции имеют различные значения показателей в зависимости от используемой смолы. Наиболее стабильными характеристиками обладает полимерная композиция на основе смолы S-PVC OXYVINIL 240.

Важное значения при производстве КПП имеют технологические свойства ПВХ пластиков. В качестве критерия оценки технологичности материалов исследуемых полимерных композиций использовали показатель текучести расплава (ПТР).

Для оптимизации процессов переработки в состав комплексных Ca-Zn стабилизаторов вводили стеарат кальция. Этот ингредиент

обеспечивает как внутренний, так и внешний смазывающий эффект. Поэтому целесообразно было провести исследования по влиянию этого ингредиента как на технологические (ПТР), так и эксплуатационные характеристики исследуемых композиций изоляционных материалов (предел прочности при разрыве, относительное удлинение при разрыве, структурно-чувствительный показатель).

По полученным результатам строили график зависимости ПТР, прочности при разрыве (σ) и относительного удлинения при разрыве (l), а также комплексного структурного показателя (ΔG) от содержания стеарата кальция. Результаты представлены на рис. 2, 3, 4 (а, б, в).

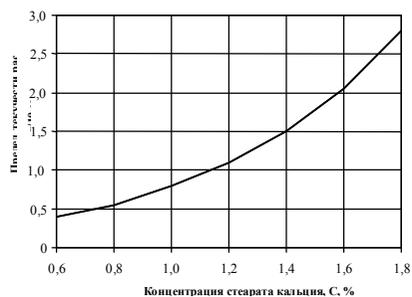


Рис. 3 – Зависимости ПТР от содержания стеарата кальция

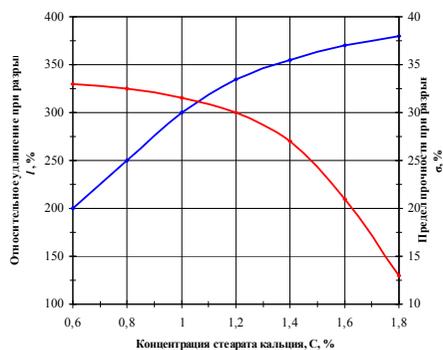


Рис. 4 – Зависимость прочности при разрыве и относительного удлинения при разрыве от содержания стеарата кальция

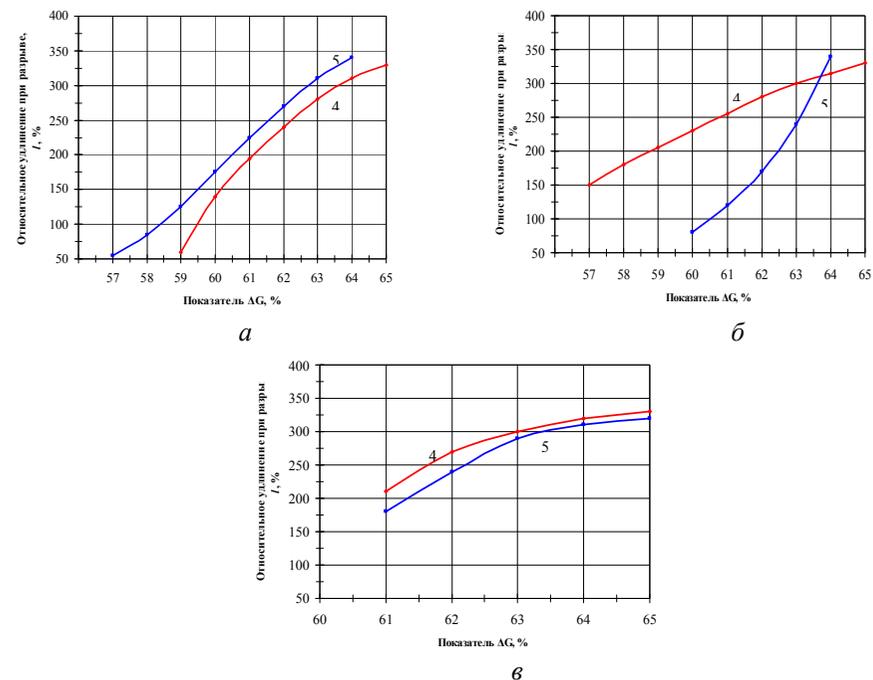


Рис. 5 – Зависимость относительного удлинения при разрыве от показателя ΔG : а – композиций 4, 5 при температуре 130 °C; б – композиций 4, 5 при температуре 110 °C; в – композиций 4, 5 при температуре 90 °C

Из представленных данных видно, что с увеличением концентрации стеарата кальция улучшаются технологические параметры полимерной композиции – увеличивается ПТР (рис. 2). Одновременно снижается предел прочности при разрыве и увеличивается относительное удлинение при разрыве (рис. 3). Комплексный структурный показатель также снижается при увеличении концентрации стеарата кальция (рис. 4 а, б, в), особенно резкое снижение наблюдается при температуре 110 °C.

Таким образом, при разработке полимерной композиции необходимо учитывать не только зависимости технологических и эксплуатационных характеристик, но и значение комплексного структурного показателя для составления оптимальных полимерных композиций на основе ПВХ для изоляции КПП. Полученные параметры могут использоваться для определения состояния материалов изоляции КПП, устанавливать причины возникновения выхода из строя (диагностический контроль) и

прогнозировать будущее состояние изоляции КПП для того, чтобы предупредить возникновение отказов (прогнозный контроль).

Результаты исследований можно применять для расчета показателей долговечности (срока службы и минимальной наработки) на стадии разработки и производства КПП, а также прогнозирования надежности КПП, которая находится в эксплуатации. При этом, методика является практически не разрабатываемой.

Список литературы: 1. Горение, деструкция и стабилизация полимеров / под редакцией д.х.н. *Заикова Г. Е.* НОТ. Санкт-Петербург, – 2008. – 422 с.; 2. *Чулеева Е. В., Чулеев В. Л., Золотарев В. М., Василюк Л. Г.* Композиционные материалы на основе поливинилхлорида. Теплофизические, реологические и электрофизические свойства // *Хімічна промисловість України*, – 2011. – № 6. – С. 48-54; 3. ДСТУ ІЕС 60811-1-1:2004 «Матеріали ізоляції та оболонки електричних і оптичних кабелів. Загальні методи випробовування. Частина 1-1. Загальна призначеність. Вимірювання товщини та зовнішніх розмірів. Випробовування для визначення механічних властивостей (ІЕС 60811-1-1:2001, IDT)»; 4. ГОСТ 11645-73 «Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов». 5. СОУ МПП 29.060.10-115:2006 «Кабелі, проводи і шнури. Загальні вимоги по надійності. Методи оцінки відповідності вимогам по надійності».

Поступила в редколлегию 15.02.2013

УДК 678

Определение структурно-чувствительного показателя и константы скорости старения полимерных композиций на основе поливинилхлорида для изоляции кабельно-проводниковой продукции / В. М. Золотарев, В. Л. Чулеев, Е. В. Чулеева, Л. Г. Василюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.68-76. Бібліогр.: 5 назв. Іл.: 5. Табл.:2.

Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень за визначенням структурно-чутливого параметра і константи швидкості старіння полімерних композицій на основі полівинілхлориду для ізоляції кабельно-провідникової продукції.

Ключові слова: полівинілхлорид (ПВХ), структурно-чутливий параметр, константа швидкості старіння, ізоляція, кабельно-провідникова продукція

The results of theoretical and experimental researches on determination of structure-sensitive parameter and senescence speed constant of polymeric compositions on the basis of PVC for the isolation of cable-explorer products are presented.

Keywords: PVC, structure-sensitive parameter, senescence speed constant, isolation, cable-explorer products, polymeric composition

УДК 621.311.001.51:621.3.018.783.3

Д.П. КАРШЕНОВ, асп., Інститут електродинаміки НАН України, Мариуполь

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ m-ПУЛЬСНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ СО СМЕШАНОЙ RLC-НАГРУЗКОЙ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аналитическим методом получены точные расчетные формулы коэффициентов гармонических составляющих тока и коэффициенты несинусоидальности тока, связывающие выход и вход произвольного m-пульсного регулируемого вентильного преобразователя и представляющие собой расчетную модель схемы замещения источниками тока высших гармоник. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: источники тока, высшие гармоники, нелинейный элемент, вентильный преобразователь.

Введение. В настоящее время в технической литературе [1-14] предложено достаточно большое количество математических моделей для описания электронных преобразовательных систем, позволяющих смоделировать параметры преобразования электроэнергии и режимы работы электрической сети. Однако в предложенных математических моделях отсутствуют общие, универсальные закономерности моделирования режимов и параметров преобразователей электроэнергии. Модели, которые известны в настоящее время, позволяют определить содержание гармонических составляющих в кривой входного тока различных выпрямителей в зависимости от параметров конкретного выпрямителя.

С другой стороны, математические модели преобразовательной техники, которые описаны в технической литературе позволяют выполнять расчеты с высокой долей погрешности. Это связано с тем, что физика работы выпрямительных устройств в предложенных решениях достаточно сложна. Содержание и доля гармонических составляющих в кривой тока, питающего m-пульсный регулируемый выпрямитель, представляет служную задачу, поскольку ток питающий m-пульсный выпрямитель является функцией не только числа пульсаций выпрямленного напряжения, но и параметров цепи выпрямителя. Теоретически, изначально используя лишь традиционные методы теоретических основ электротехники и, не располагая необходимым комплектом осциллограмм рабочих процессов, трудно получить детерминированное, логически обоснованное и явное описание процессов в этих схемах.

© Д. П.Каршенов, 2013

Эти трудности можно преодолеть, если сформулировать и систематизировать факты, полученные теоретическим путем и частично путем имитационного компьютерного моделирования, и опираясь на них решить эту задачу. Ее решение создаст необходимый информационный базис для формирования точных расчетных моделей.

В работе [2] уже предложена универсальная математическая модель m -пульсных регулируемых выпрямителей. Однако в указанной работе сделано допущение, что в цепи постоянного тока – ток идеально сглажен нагрузкой, либо сглаживающим фильтром (индуктивностью, емкостью) и ток содержит только постоянную составляющую, то есть отсутствуют пульсации в цепи постоянного тока. Указанное допущение дает погрешность расчетов коэффициентов высших гармонических составляющих входного тока и коэффициента несинусоидальности входного тока.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является уточнение математической модели универсального m -пульсного регулируемого выпрямителя с произвольной топологией и работающего на смешанную RLC-нагрузку, предложенной в работе [2]. Задача состоит в уточнении формул высших гармонических составляющих входного тока m -пульсного выпрямителя позволяющих представить указанный выпрямитель в виде источников тока.

Результаты исследований.

Система питающих напряжений синусоидальная и симметричная:

$$u_A(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega t); u_B(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); u_C(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}).$$

Общая формула выпрямленного напряжения для m -пульсного тиристорного выпрямителя, согласно ранее выполненных расчетов [2] имеет вид

$$U_d = \frac{m\sqrt{6}U_{rms.f}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left(\cos(\alpha) - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left[\left(\frac{\cos((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\cos((km+1)\alpha)}{km+1} \right) \cos(km\omega t) + \left(\frac{\sin((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\sin((km+1)\alpha)}{km+1} \right) \sin(km\omega t) \right] \right). \quad (1)$$

Для удобства последующих расчетов и исследований в формулы выпрямленного напряжения для m -пульсного тиристорного выпрямителя отдельные части выражения целесообразно заменить вспомогательными коэффициентами:

$$U_{d\max} = \frac{m\sqrt{6}U_{rms.f}}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{m} \right); E'_{km} = \left(\frac{\cos((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\cos((km+1)\alpha)}{km+1} \right);$$

$$E''_{km} = \left(\frac{\sin((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\sin((km+1)\alpha)}{km+1} \right);$$

$$E_{km} = \sqrt{(E'_{km})^2 + (E''_{km})^2} = \sqrt{\left(\frac{\cos((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\cos((km+1)\alpha)}{km+1} \right)^2 + \left(\frac{\sin((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\sin((km+1)\alpha)}{km+1} \right)^2};$$

$$\varphi_{km} = \arctg \left(\frac{\frac{\cos((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\cos((km+1)\alpha)}{km+1}}{\frac{\sin((km-1)\alpha)}{km-1} - \frac{\sin((km+1)\alpha)}{km+1}} \right).$$

Согласно [2], суммарный ток в цепи выпрямленного тока

$$i_d(t) = U_{d\max} \left(\frac{\cos(\alpha)}{R_n} - \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left[\left(\frac{E'_{km} R_n - km\omega L_n E''_{km}}{(R_n)^2 + (km\omega L_n)^2} - E''_{km} km\omega C \right) \cos(km\omega t) + \left(\frac{E'_{km} km\omega L_n + R_n E''_{km}}{(R_n)^2 + (km\omega L_n)^2} + E'_{km} km\omega C \right) \sin(km\omega t) \right] \right) \quad (2)$$

Представим сопротивления:

- полное сопротивление нагрузки: $z_{nkm} = \sqrt{R_n^2 + (km\omega L_n)^2}; \quad (3)$

- индуктивное сопротивление нагрузки: $x_{nkm} = km\omega L_n; \quad (4)$

- емкостное сопротивление: $x_{ckm} = \frac{1}{km\omega C}; \quad (5)$

Формулу выпрямленного тока (2) можно записать через модуль и фазу в виде:

$$i_d(t) = I_{d0} + \sum_{k=1}^{\infty} [I_{d(km)} \cdot \cos(km\omega t + \varphi_{эkm})], \quad (6)$$

где

- постоянная составляющая выпрямленного тока:

$$I_{d0} = \frac{U_{d\max} \cdot \cos(\alpha)}{R_n}; \quad (7)$$

- модуль тока в цепи выпрямленного тока:

$$I_{d(km)} = -(-1)^k \cdot U_{d\max} \sqrt{\left(\frac{E'_{km} R_n - x_{nkm} E''_{km}}{z_{nkm}^2} - \frac{E''_{km}}{x_{c.km}} \right)^2 + \left(\frac{E'_{km} x_{n.km} + R_n E''_{km}}{z_{n.km}^2} + \frac{E'_{km}}{x_{c.km}} \right)^2}; \quad (8)$$

- фазный угол тока в цепи выпрямленного тока:

$$\varphi_{\varepsilon km} = \arctg \left(\frac{x_{C,km} (E'_{km} x_{u,km} + R_u E'_{km}) + E'_{km} z_{u,km}^2}{x_{C,km} (E'_{km} R_u - E'_{km} x_{u,km}) - E'_{km} z_{u,km}^2} \right). \quad (9)$$

Коммутационная функция m -пульсного регулируемого выпрямителя, согласно [2] имеет вид:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{6 \sin \left[(m \cdot k \mp 1) \frac{\pi}{3} \right]}{m \cdot (m \cdot k \mp 1) \cdot \sin \left[(m \cdot k \mp 1) \frac{\pi}{m} \right]} \sin \left((mk \mp 1) \left(\omega t - (j_i - 1) \frac{2\pi}{3} + \alpha \right) \right) \right]; \quad (10)$$

$$H_{(m \cdot k \mp 1)} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{6 \sin \left[(m \cdot k \mp 1) \frac{\pi}{3} \right]}{m \cdot (m \cdot k \mp 1) \cdot \sin \left[(m \cdot k \mp 1) \frac{\pi}{m} \right]}; \quad (11)$$

$$\gamma_{(m \cdot k \mp 1)} = (mk \mp 1) \left(\alpha - (j_i - 1) \frac{2\pi}{3} \right); \quad (12)$$

$$h(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[H_{(m \cdot k \mp 1)} \sin \left((mk \mp 1) \cdot \omega t + \gamma_{(m \cdot k \mp 1)} \right) \right]; \quad (13)$$

Для модельного описания и последующего исследования входных токов питания m -пульсного регулируемого тиристорного выпрямителя, найдем фазные токи из формулы выпрямленного тока и соответствующих коммутационных функций для каждой из фаз:

$$i_A(t) = h_A(t) \cdot i_d(t), \quad i_B(t) = h_B(t) \cdot i_d(t), \quad i_C(t) = h_C(t) \cdot i_d(t). \quad (14)$$

После подстановки формул (6) и (13) в (14) получим

$$i_j(t) = h_j(t) \cdot i_d(t) =$$

$$= \sum_{k_1=0}^{\infty} \left[I_{d0} \cdot H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \sin \left((k_1 \cdot m \mp 1) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \right) \right] +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left[I_{d(km)} \cdot \cos(k \cdot m \omega t + \varphi_{\varepsilon km}) \cdot \left(\sum_{k_1=0}^{\infty} \left(H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \sin \left((k_1 \cdot m \mp 1) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \right) \right) \right) \right]; \quad (15)$$

$$i_j(t) = \sum_{k_1=0}^{\infty} \left[I_{d0} \cdot H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \sin \left((k_1 \cdot m \mp 1) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \right) \right] +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left[\sum_{k_1=0}^{\infty} \left[I_{d(km)} \cdot H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \cdot \sin \left((k_1 \cdot m \mp 1) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \right) \right] \cdot \cos(km \omega t + \varphi_{\varepsilon km}) \right] =$$

$$= \sum_{k_1=0}^{\infty} \left[I_{d0} \cdot H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \sin \left((k_1 \cdot m \mp 1) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \right) \right] +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\sum_{k_1=0}^{\infty} \left[I_{d(km)} \cdot H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \cdot \sin \left((k_1 - k) \cdot m \mp 1 \right) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} - \varphi_{\varepsilon km} \right) \right] +$$

$$I_{d(km)} \cdot H_{(k_1 \cdot m \mp 1)} \cdot \sin \left((k_1 + k) \cdot m \mp 1 \right) \cdot \omega t + \gamma_{(k_1 \cdot m \mp 1)} + \varphi_{\varepsilon km} \right] \Big];$$

$v = m \cdot k \mp 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Первая гармоника

$$i_{j1}(t) = I_{d0} \cdot H_1 \cdot \sin(\omega t + \gamma_1) \pm \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left[I_{dmk} \cdot H_{(k \cdot m \mp 1)} \sin(\omega t \mp \gamma_{(k \cdot m \mp 1)} \pm \varphi_{mk}) \right]. \quad (16)$$

Высшие гармонические составляющие тока (при $v > 1$)

$$i_{jv}(t) = I_{d0} \cdot H_v \cdot \sin(v \cdot \omega t + \gamma_v) \pm \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{k \cdot m \pm v}{|k \cdot m \pm v|} I_{dmk} \cdot H_{(k \cdot m \pm v)} \sin(v \cdot \omega t \pm \gamma_{(k \cdot m \pm v)} \mp \varphi_{mk}) \right]. \quad (17)$$

Если принять, что $\varphi_{0,m} \equiv 0$, то функция входного тока m -пульсного регулируемого выпрямителя примет вид

$$i_{jv}(t) = \pm \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{k \cdot m \pm v}{|k \cdot m \pm v|} I_{dmk} \cdot H_{(k \cdot m \pm v)} \sin(v \cdot \omega t \pm \gamma_{(k \cdot m \pm v)} \mp \varphi_{mk}) \right]. \quad (18)$$

Таким образом, выполненные исследования показали, что физика работы выпрямительных устройств в предложенных решениях достаточно сложна и любая гармоническая составляющая входного тока регулируемого многопульсного выпрямителя состоит из геометрической суммы векторов, частота которых одинакова и равна номеру гармоники, а амплитуды и фазы зависят от коммутационной функции и функции выпрямленного тока.

Действующее значение тока любой гармонической составляющей (18) выражают через мгновенное значение следующим образом:

$$I_{jv} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{jv}^2(t) dt};$$

$$I_{jv} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{I_{dmk} \cdot H_{(k \cdot m \pm v)}}{2} \right)^2}. \quad (19)$$

Следовательно, действующее значение гармоники входного тока регулируемого многопульсного выпрямителя равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений ее отдельных составляющих и не зависит от угла сдвига фаз этих составляющих. Иными словами, действующее значение входного тока регулируемого многопульсного

выпрямителя зависит от величин I_{dmk} , $H_{(k-m\pm v)}$ и не зависит от величин $\gamma_{(k-m\pm v)}$, Φ_{mk} .

Учитывая формулы (19), спектр гармоник входного тока регулируемого m -пульсного выпрямителя в относительных единицах представляет собой коэффициенты высших гармонических составляющих тока (коэффициент несинусоидальности тока).

$$K_{I_{j(v)}} = I_{j(v)}^* = \frac{I_{j(v)}}{I_{j(1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{\infty} (I_{dmk} \cdot H_{(k-m\pm v)})^2}{\sum_{k=0}^{\infty} (I_{dmk} \cdot H_{(k-m\pm 1)})^2}}, \quad (20)$$

$$THD_{I_j} = K_{I_j} = I_j^* = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} I_{j(v)}^2}{I_{j(1)}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{\infty} (I_{dmk} \cdot H_{(k-m\pm v)})^2 \right)}{\sum_{k=0}^{\infty} (I_{dmk} \cdot H_{(k-m\pm 1)})^2}}, \quad (21)$$

где v - номер гармоники;

$I_{j(v)}$ - действующее значение тока v -ой гармоники;

$K_{I_{j(v)}}$ - коэффициент v -ой гармонической составляющей тока, в о.е.;

K_{I_j} - коэффициент несинусоидальности кривой тока, в о.е.

Таким образом, аналитическим методом уточнены расчетные модели управляемого вентильного преобразователя как источника токов высших гармоник. Формулы дают возможность с необходимой точностью определить действующее значение гармоник фазного тока для любого управляемого вентильного преобразователя и рассчитать коэффициенты высших гармонических составляющих тока и коэффициенты несинусоидальности тока. С помощью полученных точных значений коэффициентов высших гармонических составляющих можно определить реальные действующие значения генерируемых токов высших гармоник.

Список литературы: 1. Волков И.В. Каршенов Д.П. Универсальные математические модели m -пульсных выпрямителей со смешанной RLC-нагрузкой в цепи постоянного тока / Волков И.В. Каршенов Д.П. // Техническая электродинамика. – 2012. - №4. 2. Волков И.В. Каршенов Д.П. Математические модели и схемы замещения m -пульсных регулируемых выпрямителей. / Волков И.В. Каршенов Д.П. // Вестник НТУ «ХПИ», Тем. выпуск «Энергетика: надежность и энергоэффективность» – №23. - 2012. – 189с. 3. Галкин В.И. Промышленная электроника: Учеб. пособие. / Галкин В.И. – Мн.:Выш.шк., 1989. – 336 с. 4. Гумен М.Б. та ін. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. // М.Б.Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак, Ю.Г. Савченко; За ред. М.Б. Гумена. – К.: Вища шк., 2004. – 391с. 5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с. 6. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для

вузов. / Забродин Ю.С. – М.: Высш.школа, 1982 – 496 с. 7. Каршенов Д.П. Малоискажающие многопульсные несимметричные трехфазные выпрямительные системы / Каршенов Д.П. // Труды Института электродинамики. – 2012. - №34. 8. Levin M., Волков И.В., Пентегов И.В., Рымар С.В., Ларченко Б.Б. Улучшение качества электроэнергии в электросетях с мощными 12-пульсными выпрямителями с помощью гексагональных автотрансформаторных устройств. / Levin M., Волков И.В., Пентегов И.В., Рымар С.В., Ларченко Б.Б. // Техническая электродинамика, Тем. выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность. Ч. 1.- К.: ИЭД НАНУ, 2002.-С 23-27. 9. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. / Маевский О.А. – М.: Энергия, 1978. – 320 с. 10. Мерабишвили П.Ф., Ярошенко Е.М. Нестационарные электромагнитные процессы в системах с вентилями. / Мерабишвили П.Ф., Ярошенко Е.М. – Кишенев: Штиинца, 1980. – 208 с. 11. Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. Устройства подавления высших гармоник тока. / Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. // Техническая электродинамика, Тем. вып. «Проблемы современной электродинамики», Ч.1., К.-2002, С.- 13-22. 12. Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. Схемы подавления высших гармоник тока с расщеплением фаз на три составляющие и методы их расчета. / Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. // Техническая электродинамика, Тем. выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность. Ч. 1.- К.: ИЭД НАНУ, 2002.-С 71-78. 13. Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power. / Paice D.A.- NY: IEEE PRESS, 1995.-202 p. 14. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. / Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. – К.: Наукова думка, 2005. – 207с.

Поступила в редколлегию 28.01.2013

УДК 621.311.001.51:621.3.018.783.3

Уточнение математической модели m -пульсных регулируемых выпрямителей со смешанной RLC-нагрузкой в цепи постоянного тока / Каршенов Д.П. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - №.17 (990). – С.77-83. Бібліогр.: 14 назв.

Аналитичним методом отримані точні розрахункові формули коефіцієнтів гармонійних складових струму та коефіцієнти несинусоїдальності струму, які зв'язують вихід і вхід довільного m -пульсного регульованого вентильного перетворювача і що є розрахунковою моделлю схеми заміщення джерелами струму вищих гармонік.

Ключові слова: джерела струму, вищі гармоніки, нелінійний елемент, вентильний перетворювач.

The analytical method gains exact design formulas of coefficients of harmonic components of a current and Total Harmonics Distortion (THD) of a current, a linking exit and an inlet arbitrary m -pulse of controllable valve inverter representing computational model of an equivalent circuit by current sources of upper harmonics.

Keywords: current sources, upper harmonics, a nonlinear element, the valve inverter.

КИМ ЕН ДАР, д-р техн. наук, дир. АО «Социо», Киев;

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОПРОВОДА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

На основе решения уравнения теплопроводности даны аналитические соотношения для расчета радиального температурного поля в проходном изоляторе, обусловленного протеканием с учетом скин-эффекта тока по токопроводу. Дано аналитическое соотношение между радиальными геометрическими параметрами проходного изолятора и допустимым по условию нагрева номинальным током.

Ключевые слова: проходной изолятор, токопровод, температуропроводность, допустимый ток, условие нагрева

Токопроводы проходных высоковольтных изоляторов с полимерной изоляцией имеют цилиндрическую форму и выполняются из алюминия или меди. Изоляционное тело состоит из двух элементов: из прочной опорной цилиндрической втулки, представляющей собой стеклопластиковую трубу, и из эластичной изоляции, например, из кремнийорганической резины. Резиной целиком заполняется пространство между токопроводом, опорной втулкой и фланцем. Внешняя поверхность втулки покрывается защитной оболочкой из той же резины монолитно со слоем под фланцем. Таким образом, проходной изолятор можно представить как изоляцию цилиндрического конденсаторного типа.

Одним из методов оценки надежной работы проходных изоляторов является испытание на нагрев пропусканием по токопроводу длительного номинального тока I_n до установления равновесного теплового состояния, и затем воздействием кратковременным током $I_{кр}$ промышленной частоты. Если не оговорены иные требования, то согласно действующим стандартам [1, 2] изолятор с номинальным током $I_n < 4000$ А должен выдержать протекание тока $I_{кр}$, равного 25-кратной величине номинального тока I_n с длительностью $t_{кр} = 1$ с, для изоляторов с $I_n > 4000$ А – $I_{кр} = 100$ кА, $t_{кр} = 1$ с.

Испытание должно проводиться в помещении с температурой воздуха не менее $T_b = 40$ °С. Испытуемый объект считается успешно прошедшим испытание, если не обнаружены видимые повреждения и при этом установившаяся температура токопровода $T_{т.н}$ при номинальном токе не превысила 90 °С, а после наложения кратковременного сильного тока токопровод не нагрелась свыше 180 °С:

$$T_b \leq 90 \text{ °С}; \quad T_{т.н} \leq 180 \text{ °С}. \quad (1)$$

© Ким Ен Дар, 2013

Цилиндрическая геометрия изолятора позволяет нам упростить исследование теплового поля и ограничиться рассмотрением

дифференциального уравнения теплопроводности для осесимметричной задачи, в общем случае, нестационарного режима с внутренним источником теплоты

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_0}{c\sigma}, \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности; q_0 – удельная по объему энергия внутреннего источника, выделяемая за единицу времени; c – удельная по массе теплоемкость; σ – плотность вещества.

Поскольку длина l проходного изолятора намного больше среднего его диаметра, то для приближенной оценки температурного распределения можно пренебречь теплообменом с торцов изолятора и слагаемую по z в уравнении (2) принять равной нулю.

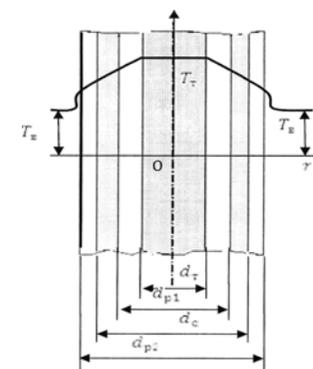


Рис. 1 – Расчетная модель проходного изолятора

Рассмотрим вначале теплопередачу для бесконечно длинного многослойного цилиндра (рис. 1) в стационарном режиме. При этом уравнение (2) упрощается к следующему виду:

$$\alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{q_0}{c\sigma} = 0. \quad (3)$$

Для исследования теплового состояния можно воспользоваться известным решением [3], полученным для граничных условий третьего рода, когда теплота отводится только через наружную поверхность, при этом коэффициент теплопередачи α_b и температура окружающей среды T_b

сохраняются постоянным. А на границах слоев соблюдается условие сохранения линейной плотности теплового потока q_l :

$$q_l = \pi d_1 q_1 = \pi d_2 q_2 = \dots, \quad (4)$$

$$q_l = q_0 \cdot V_0 / l; \quad (5)$$

где V_0 и l – объем и длина реального источника тепла, в данном случае, токопровода; q_1, q_2, \dots – поверхностная плотность теплового потока на границах слоев.

Если принимается допущение о независимости теплофизических параметров материалов изолятора от температуры, то решение уравнения (3) приводит к следующим соотношениям для расчета температур на границах раздела слоев:

$$\left. \begin{aligned} T_{p1} &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p1} d_{p2}}{d_\tau d_c} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_\tau}{d_{p1}} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \\ T_c &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_\tau}{d_{p1}} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p2}}{d_\tau} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \\ T_{p2} &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p2}}{d_\tau} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \\ T_{p3} &= T_g + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_g d_{p2}} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $T_{p1}, T_c, T_{p2}, T_{p3}$ – температуры на границах токопровод–резина при d_τ , резина–стеклопластиковая труба при d_{p1} , стеклопластиковая труба–резина при d_{p1} , резина–воздушная среда при d_{p2} соответственно (см. рис. 1); λ_p, λ_c – коэффициенты теплопроводности резины и стеклопластика соответственно; α_g – коэффициент температуропередачи воздуха.

В формулах (6) выражения в скобках представляют собой термические сопротивления на единицу осевой длины между внешней средой и до той границы, на которой определяется температура.

По аналогии с (6) температуру токопровода можно определить через общее для изолятора термическое сопротивление $R_{\tau l}$:

$$T_{\tau n} = T_b + \frac{q_l}{\pi} R_{\tau l}; \quad (7)$$

$$R_{\tau l} = \frac{1}{\alpha_\tau d_\tau} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_{p1} d_{p2}}{d_\tau d_c} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_c}{d_{p1}} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}}. \quad (8)$$

Установим взаимосвязь между линейной плотностью теплового потока q_l и номинальным током I_n с учетом скин-эффекта. Согласно

теории распространения электромагнитного поля глубина проникновения поля в проводящую среду зависит от частоты волны f . При удалении от поверхности проводника она убывает и на глубине θ становится меньше в e раз. На практике принято, что весь ток сосредоточен в слое толщиной θ [4]:

$$\theta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu \mu_0}}, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м – магнитная постоянная вакуума; μ – магнитная проницаемость проводника.

С учетом последнего получаем формулу для расчета линейной плотности источника теплового потока, соответствующую номинальному току

$$q_l = \frac{\rho I_n^2}{S_g}; \quad (10)$$

где $S_g = \pi\theta(d_\tau - \theta)$ – эквивалентная площадь сечения проводника.

Как можно видеть из табл. 1 коэффициенты теплоотдачи α у металлов существенно выше, чем у воздуха, вместе с тем коэффициенты теплопроводности резины и стеклопластика близки между собой. Поэтому для инженерного расчета можно воспользоваться упрощенной формулой термического сопротивления изоляции:

$$R_{\tau l} \approx \frac{1}{2\lambda_g} \ln \frac{d_{p2}}{d_\tau} + \frac{1}{\alpha_g d_{p2}}. \quad (11)$$

В этой формуле в качестве λ_g предпочтительнее принять либо коэффициент теплопроводности резины, если ее толщина заметно больше толщины стеклопластиковой трубы; либо среднюю величину коэффициентов этих двух материалов, если их толщины существенно не разнятся между собой.

Рассмотрим нагрев изолятора кратковременным сильным током.

Из анализа нестационарных тепловых задач [3] вытекает, что процесс охлаждения твердых тел происходит по экспоненциальной зависимости $\exp\left(-\mu_1^2 \frac{at}{b}\right)$ с показателем, определяющим по сути от коэффициента

температуропроводности окружающей нагретого объекта среды a и от характерного геометрического параметра этого объекта b . В данном случае $a = a_p$ или a_c – коэффициент температуропроводности резины или стеклопластика (см. табл. 1) и $b = d_\tau / 2$ – радиус токопровода. Можно показать, что для рассматриваемой задачи число $\mu \approx 1,53$, и, таким

образом, теплоотводом, протекающим в течение даже нескольких десятков секунд можно пренебречь.

Таблица – Удельные характеристики материалов

Материал	Алюминий	Медь	Стеклопластик	Резина	Воздух
Уд. сопротивление ρ , Ом·м	$2,71-2,87 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{16}$
Уд. вес σ , кг/м ³	2700-2800	8960	1800	957-1090	1,1-1,2
Кэф. теплопр. λ , Вт/м·К	209	393	0,35-0,43	0,15	0,02-0,03
Уд. теплоемк. c , Дж/кг·°С	920	400	920	1,46	1000
Кэф. теплоотд. α , Вт/м ² ·К	220	410		13	6,9
Кэф. температ. a , м ² /с	$8,42 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$

Следовательно, нагрев токопровода сильным током протекает, практически, мгновенно без каких-то ни было потерь, по этой причине общее уравнение теплопередачи (2) можно упростить к следующему виду:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_0}{c_T \rho} \quad (12)$$

Откуда получаем выражение для оценки наибольшей температуры токопровода при воздействии кратковременного тока:

$$T_{T.M} = T_{T.H} + \frac{q_0}{c_T \rho} \Delta t, \quad (13)$$

где $T_{T.H}$ – начальная температура, равная температуре токопровода при номинальном токе, см. формулу (7); $\Delta t = t_{кр}$ – длительность протекания сильного тока.

Воспользовавшись соотношениями (5) и (10) и с учетом поверхностного эффекта (9), запишем формулу для оценки температуры токопровода, обусловленного протеканием кратковременного тока в следующем виде

$$T_{кр} = \frac{q_0}{c_T \rho} \Delta t = \frac{\rho}{c_T \rho} \frac{I_{кр}^2}{S_T S_3} \Delta t, \quad (14)$$

где S_T – площадь сечения токопровода.

На рис. 2 дан пример расчета по формулам (7) и (13) температуры токопровода моделей полимерного проходного изолятора с различными номинальными токами. Толщины изоляционных слоев моделей соответствовали изоляторам на 35 кВ, расчет выполнялся для внешней среды, $T_g = 40^\circ\text{C}$. Кривые верхнего рис. 2 соответствуют длительным номинальным токам I_H (7), а кривые нижнего рисунка – длительным и кратковременным токам (13), равным $I_{кр} = 25 I_H$ и $\Delta t = 1$ с.

Анализ приведенных зависимостей (рис. 2) показывают, что, если выбранный токопровод удовлетворяет условию нагрева номинальным током: $T_{T.H} \leq 90^\circ\text{C}$, то такой токопровод также удовлетворяет условию последующего нагрева кратковременным током: $T_{T.M} \leq 180^\circ\text{C}$. Вследствие такого обстоятельства при выборе диаметра токопровода достаточно ориентироваться на условие допустимого нагрева номинальным током.

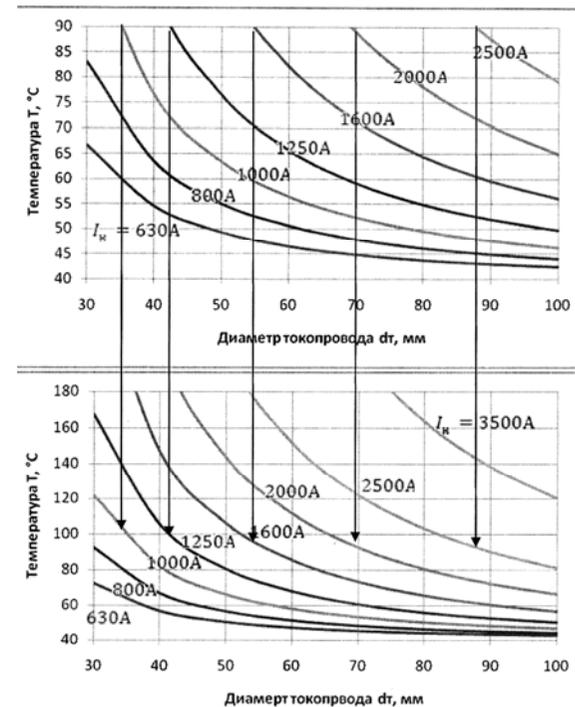


Рис. 2 – Зависимости температуры токопровода от его диаметра при различных значениях номинального тока

Если известны характеристики материалов изоляции и токопровода, то из (7) можно установить оптимальную по условию нагрева (1) область основных геометрических параметров изолятора, соответствующих заданным номинальным токам. Внешний диаметр d_{p2} цилиндрической части проходного изолятора определяется внутренним диаметром фланца, что в свою очередь выбирается из условия обеспечения необходимой внутренней электрической прочности изолятора. Поэтому есть смысл ввести новый параметр, косвенно, характеризующий внутреннюю прочность $h_{из} = d_{p2} - d_T$.

Полагаем, что температура воздушной среды $T_b = 0$. Соответственно, допустимая температура токопровода равна $T_{т.д} = 50$ °С. Примем упрощенную формулу (11) для термического сопротивления изолятора, тогда из (7) получаем следующее соотношение для номинального допустимого тока

$$I_{т.д} < \pi \sqrt{\frac{2\lambda_3 \cdot \theta(d_T - \theta) \Gamma_{т.д}}{\rho \left[\ln \left(1 + \frac{h_{из}}{d_T} \right) + \frac{2\lambda_3}{\alpha_e(d_T + h_{из})} \right]}}. \quad (15)$$

Например, для изолятора с алюминиевым токопроводом и $\lambda_3 = \lambda_p$ имеем:

$$I_{т.д} < 7980 \sqrt{\frac{d_T - 0,012}{\ln \left(1 + \frac{h_{из}}{d_T} \right) + \frac{0,0435}{(d_T + h_{из})}}}. \quad (16)$$

Согласно критерию (16) на рис. 3 приведены границы оптимальных соотношений искомых параметров проходного изолятора с полимерной изоляцией.

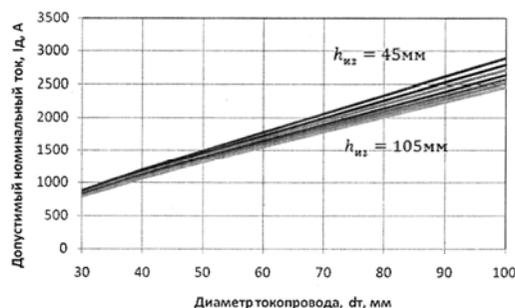


Рис. 3 – Соотношение между допустимым номинальным током, диаметром токопровода и толщиной изоляции

Как можно видеть из этого рисунка, термическое состояние токопровода, практически, линейно зависит от его диаметра, а влияние толщины изоляции отмечается по мере увеличения допустимого номинального тока. После того как выбран диаметр токопровода по заданному номинальному току, не выходящему за пределы оптимальной области, ожидаемые величины температур токопровода и на границах изоляционных слоев можно вычислить по приведенным ранее формулам.

Выводы. На основе решения уравнения теплопроводности приведены аналитические соотношения для расчета радиального температурного поля в проходном изоляторе, обусловленного протеканием с учетом скин-эффекта тока по токопроводу. Установлено, что, если токопровод изолятора выбран по условию допустимой температуры нагрева при номинальном токе, то такой токопровод заведомо удовлетворяет условию допустимой температуры нагрева при наложении соответствующего кратковременного сильного тока. Дано аналитическое соотношение между радиальными геометрическими параметрами проходного изолятора и допустимым по условию нагрева номинальным током.

Список литературы: 1. IEC 60137:2003. Insulated bushings for alternating voltages above 1 000V. 2. ГОСТ 8024-90 Аппараты и электрические устройства переменного тока на напряжение свыше 1 000В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. 3. ГОСТ 22229-83. Изоляторы керамические проходные на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. 3. *Исаенко В. П.* Теплопередача / *В.П. Исаенко, В.А. Осипова, А.С. Сукомэл.* – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с. 4. *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм / *А. Н. Матвеев.* – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.

Поступила в редколлегию 18.03.2013

УДК 621.315.626.1

Методика расчета токопровода высоковольтных полимерных проходных изоляторов / Ким Ен Дар // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – №.17 (990). – С.84-91. Бібліогр.: 4 назв. Табл.: 1. Іл.: 3.

На основі рішення рівняння теплопровідності наведені аналітичні співвідношення для розрахунку радіального температурного поля в проходному ізоляторі, обумовленого протіканням з урахуванням скин - ефекту струму по струмопроводу. Дано аналітичне співвідношення між радіальними геометричними параметрами проходного ізолятора і допустимим за умовою нагріву номінальним струмом.

Ключевые слова: проходной изолятор, токопровод, температуропроводность, допустимый ток, условие нагрева

Based on the solution of the heat equation and the skin - the effect the analytical relations for calculating the radial temperature distribution in the bushing is given. An analytical relationship between the radial geometric parameters of the bushing and the nominal current that allowable by the heating is given.

Keywords: bushing, conductors, thermal diffusivity, admits timy-current condition heating

КИМ ЕН ДАР, д-р техн. наук, дир. АО «Социо», Киев;
А. В. НАЗАРЕНКО, инж. «Славэнергопром», Славянск;
Д. Г. КАРЮК, инж. «Славэнергопром», Славянск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Предложена методическая основа оптимизации электрического поля полимерного проходного изолятора, дано аналитическое выражение для оценки максимальной напряженности поля в изоляционном промежутке токопровод – фланец.

Ключевые слова: токопровод, проходной изолятор, фланец, напряженность поля.

Основными функциональными элементами конструкции высоковольтных проходных изоляторов являются токопровод, концентрически охватывающие его изоляционное тело и металлический фланец. В рабочем режиме токопровод находится под высоким потенциалом, а фланец заземляется. При этом изоляционное тело несет электрическую нагрузку, а также в сочетании с фланцем и механическую нагрузку. Соответственно надежность работы высоковольтных проходных изоляторов определяется электрической и механической прочностью этих элементов.

Целесообразность замены фарфоровой изоляции на полимерные обосновывается, прежде всего, возможностью существенного снижения вероятности механической поломки изоляционных конструкций. Как известно, смолы полиэфирные и эпоксидные, используемые при изготовлении стеклопластиковых труб и стержней, имеют такую же прочность на разрыв, что и фарфор. В тоже время удельная энергия на развитие трещины, что по сути является энергий разрушения изделия, оценивается величиной 100 Дж/м² [1], что на два порядка больше, чем у фарфора. Вследствие этого можно прогнозировать, что при замене в проходном изоляторе хрупкого фарфорового диэлектрика аналогичным элементом из пластического материала, например, из стеклопластиковой трубы, механическое разрушение, обусловленное различными внешними факторами, в том числе динамическим нагревом токопровода, практически можно исключить [2]. В современных полимерных проходных изоляторах токопровод имеет цилиндрическую форму. Изоляционное тело, охватывающее концентрически токопровод, выполняется из двух составляющих: из прочной опорной цилиндрической втулки, представляющей собой стеклопластиковую трубу, и из эластичной изоляции, например, из кремнийорганической резины.

© Ким Ен Дар, А. В. Назаренко, Д. Г. Карюк, 2013

Резиной целиком заполняется пространство между токопроводом и опорной втулкой. Ею покрывают внешнюю поверхность втулки, и заполняется монолитно с защитным покрытием промежутков втулка – фланец. Принимаемая мера по герметизации для полимерных изоляторов обусловлена необходимостью защиты стеклопластиковой втулки от конденсации атмосферной влаги на ее поверхности и минимизации очагов электрического повреждения изоляции. Таким образом, проходной изолятор можно представить как изоляцию цилиндрического конденсаторного типа.

Известно, что на распределение электрического поля в многослойном изоляционном промежутке, в данном случае, токопровод – заземляемый фланец, существенное влияние оказывают диэлектрические характеристики составных элементов изоляции и соотношение их толщин. Кроме того максимальные значения напряженности электрического поля, что имеет место у поверхности электродов: у токопровода и фланца, также зависят от взаимного расположения и их конфигурации.

Для инженерной практики, прежде всего, представляет интерес возможность априори установить основные геометрические параметры будущей конструкции изолятора, в пределах которых прогнозируется допустимая электрическая его прочность. Поэтому, в первую очередь, определим область оптимальных соотношений между геометрическими параметрами и диэлектрическими свойствами изоляции, а затем рассмотрим возможность снижения краевых эффектов на электродах изолятора.

В первом приближении для оценки максимальной напряженности поля в серединной области изолятора, на поверхности токопровода напротив фланца, воспользуемся уравнением поля цилиндрического конденсатора [3]

$$E_{m.t} < E_{m.ц} = \frac{U}{r_0} \frac{1}{\left(\ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}. \quad (1)$$

Принятые в (1) обозначения соответствуют рис. 1. Знак «меньше» в уравнении означает, что действительная максимальная напряженность поля $E_{m.t}$ на поверхности токопровода окажется меньше чем $E_{m.ц}$ вычисляемая по формуле (1), так как в реальных проходных изоляторах осевая длина фланца на много меньше длины токопровода.

Теперь представим себе плоскопараллельную многослойную изоляционную систему с теми же толщинами составляющих и диэлектрическими характеристиками, что и для цилиндрического

конденсатора рис. 1. В этом случае напряженность поля $E_{м.п}$ на поверхности высоковольтного электрода определяется как:

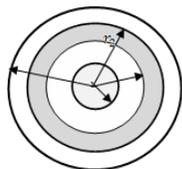


Рис. 1 – Радиальное сечение макета изолятора

Нетрудно догадаться, что искомая напряженность по величине будет больше, чем в случае поля плоскопараллельной системы: $E_{м.т} > E_{м.п}$.

Вследствие чего для приближенной оценки можно ориентироваться на $E_{м.т}$, равные среднеарифметическим значениям напряженностей для выше приведенных упрощенных изоляционных систем:

$$E_{м.т} \approx 0,5(E_{м.ц} + E_{м.п}) \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) можно видеть, что независимо от толщины опорной трубки наименьшие значения $E_{м.т}$ будут иметь место при $\epsilon_1 = \epsilon_2$. Вместе с тем измерения показывают, что диэлектрическая проницаемость используемой резины составляет $\epsilon_1 \approx 2,5$, тогда как для материала из стеклопластика этот параметр в зависимости от изготовителя колеблется в диапазоне $4 \leq \epsilon_2 \leq 8$. Такое соотношение между диэлектрическими параметрами приводит к существенному вытеснению электрического поля из объема опорной втулки в сторону резины и чем толще стенка трубки ($\Delta r = r_2 - r_1$), тем сильнее проявляется фактор толщины на перераспределения поля.

Наглядное представление о взаимосвязи между диэлектрическими проницаемостями изоляции и толщиной Δr , в первом приближении, можно получить из формулы (2) для плоскопараллельной системы. Из (2) вытекает следующее условие минимума напряженности поля $E_{м.т}$

$$\left[\frac{\Delta R - \Delta r}{\Delta R} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \left(1 - \frac{\Delta R - \Delta r}{\Delta R} \right) \right] > 1, \quad (4)$$

где ΔR – расстояние изоляционного промежутка.

Откуда с учетом того, что $(\epsilon_1/\epsilon_2) < 1$, получаем условие, при соблюдении которого можно ожидать, что напряженность поля в резине у поверхности токопровода незначительно будет отличаться от возможной минимальной величины

$$\frac{\Delta r}{\Delta R} < \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлена приближенная область оптимальных соотношений, ограниченная штриховой линией, соответствующей условию (5). Как можно видеть эта область охватывает возможные сочетания параметров, в пределах которых верхнее ограничение напряженность поля $E_{м.т}$, определяемое по формуле (1) не превышает 15% наименьшей максимальной величины, соответствующей случаю $\epsilon_1 = \epsilon_2$.

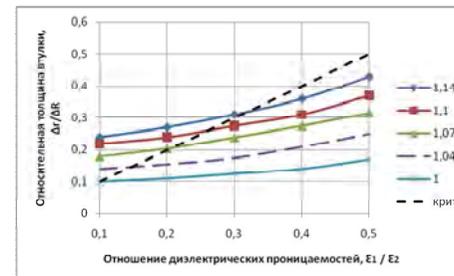


Рис. 2 – Область оптимальных соотношений между диэлектрическими характеристиками изоляций и радиальными параметрами

Для того чтобы детальнее исследовать электрическое поле проходного изолятора, а также установить влияние конфигурации краев заземляемого электрода – фланца обратимся к численному расчету поля. Для этой цели воспользуемся существующими программными средствами решения уравнений потенциального поля с учетом комплексной проводимостью изучаемой области

$$\text{div}[(\sigma + j\omega\epsilon_0)\text{grad}\phi] = 0, \quad (6)$$

где σ – удельная проводимость изоляций; ω – угловая частота приложенного напряжения; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; j – комплексная единица; ϕ – искомый потенциал; $\text{grad}\phi = \vec{E}$ – вектор напряженности поля.

Расчеты проводились в области оптимума (5) и в близкой ей окрестности. При расчете были приняты следующие параметры модели высоковольтного проходного изолятора с номинальным напряжением 35 кВ:

Таблица – Параметры модели проходного изолятора

Напряжение	Материал (σ , См/м)			Радиусы	
	Резина	Стеклопластик	Воздух	r_0	r_3
$U = 25$ кВ	$\epsilon_1 = 2,5;$ $\sigma_1 = 1 \cdot 10^{-13}$	$\epsilon_2 = 4-8;$ $\sigma_2 = 1 \cdot 10^{-12}$	$\epsilon_b = 1;$ $\sigma_b = 1 \cdot 10^{-16}$	20 мм	23 мм

Как оказалось место расположения опорного элемента в изоляционном промежутке практически не оказывает влияние на величину максимальной напряженности поля. В тоже время с точки зрения механической прочности предпочтительнее, чтобы опорная втулка максимально близко располагалась бы к фланцу, но с учетом технологической возможности заполнения зазора между ними эластичной изоляцией. По этой причине расчеты выполнялись при $r_2 = 20$ мм. Результаты расчета представлены на рис. 3–5.

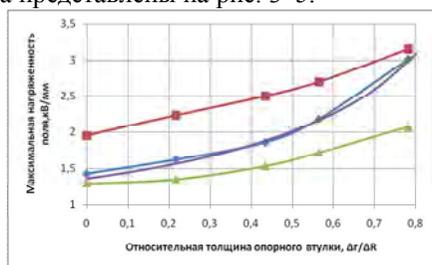


Рис. 3 – Зависимость максимальных напряженностей поля от относительной толщины

Прежде всего, отметим хорошую сходимость данных расчетов напряженности поля в непосредственной близости у токопровода $E_{m,т}$, выполненных численным путем (5) и аналитически согласно (3). Такая сходимость наблюдалась, практически, для всего диапазона изменения толщины $\Delta r/\Delta R$, о чем свидетельствуют кривые 1 и 4 на рис. 3.

Расчеты подтвердили о значимом влиянии толщины опорного элемента и диэлектрических свойств изолирующих элементов на распределение поля в междуэлектродной области. Из рис.3 вытекает, что при фиксированном межэлектродном расстоянии ΔR с увеличением толщины опорной втулки Δr напряженность поля у токопровода $E_{m,т}$ возрастает заметно круче, чем напряженность $E_{m,ф}$ на краях фланца (см. рис.3, кривые 1, 2). Кроме того, напряженность поля на краях фланца по величине значительно превышает поле у токопровода вследствие сгущения силовых линий на краях электрода.

Как известно, краевой эффект удается существенно смягчить увеличивая радиус кривизны, в данном случае, торцевой части электрода. В качестве иллюстрации на рис. 4 сопоставлены две картины эквипотенциальных линий электрического поля вблизи краев фланца до и после изменения профиля по образцу электрода Роговского [4].

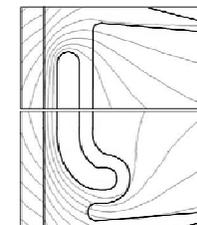


Рис. 4 – Эквипотенциальные линии поля у краев фланца

Количественная оценка сравниваемых полей представлена на (рис. 5) в виде распределений напряженностей вдоль наиболее электрически нагруженных поверхностей краев электрода. Величины поля на этом рисунке приведены в относительных единицах, относительно наибольшей напряженности на поверхности края фланца с измененным профилем. Это сделано для того чтобы непосредственно представить уровень возможного выравнивания поля. Как можно заключить по рис. 3 (сравни кривые 2 и 3) и рис. 5, посредством оптимизации формы краев фланца удается уменьшить напряженности поля ниже напряженности поля на поверхности токопровода:

$$E_{m,ф} < E_{m,т} \quad (7)$$

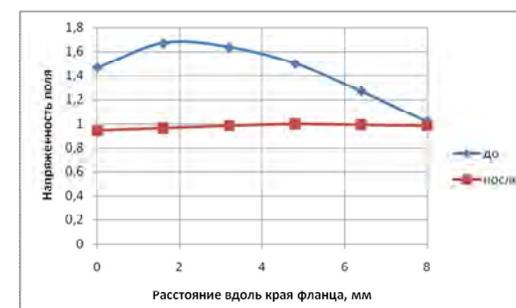


Рис. 5 – Распределение напряженности поля вдоль поверхности краев фланца

Основываясь на выполненных исследованиях можно сформулировать следующие рекомендации по оптимизации электрического поля проходного изолятора:

– при заданных исходных параметрах: радиуса токопровода r_0 , диэлектрических характеристик изоляции ϵ_1 и ϵ_2 , определить относительную толщину опорной втулки $\Delta r / \Delta R$ согласно (5);

– установить изоляционное расстояние между электродами ΔR по формуле (3), принимая за максимальную напряженность поля у токопровода $E_{m,т}$ электрическую прочность σ_r используемой резины с учетом коэффициента запаса k :

$$E_{m,т} \leq k \sigma_p, \quad (8)$$

тем самым определить радиусы опорной втулки, r_1 и r_2 ;

- проверить опорную втулку на механическую прочность. В случае, если втулка не удовлетворяет по механической прочности (либо из – за чрезмерно большого запаса прочности, либо вследствие пониженной прочности), то уменьшив или увеличив на шаг радиусы r_1 и r_2 ; провести повторные расчеты согласно (5) и (8). Таким образом, определить наиболее подходящие радиальные параметры изолятора;

- краям фланца придать форму, близкую по форме краям электрода Роговского с тем, чтобы максимальная напряженность $E_{m,ф}$ у фланца не превышала напряженности поля $E_{m,т}$ у токопровода (7).

Список литературы: 1. Гордон Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи / Дж. Гордон – М.: Мир, 1980. - 327 с. 2. Ким Е.Д. Оценка термоупругих напряжений в фарфоровом проходном изоляторе / Е. Д. Ким // Энергетика та електрифікація. – 2012. – №2 – С. 45–48. 3. Костенко М. В. Техника высоких напряжений / М.В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с. 4. Патент RU(11)2423765(13)C1(51). Способ подбора профиля поверхности электродов для высоковольтных разрядников. Юрьев А.Л.,(RU), Николаев Д.П.,(RU), Эльши С.Л. 2006. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.freepatent.ru/patents/2423765

Поступила в редколлегию 05.02.2013

УДК 621.315

Исследование электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией / Е. Д. Ким, А. В. Назаренко, Д. Г. Карюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – №17 (990). – С.92-98. Бібліогр.: 4 назв. Іл.:5.

Запропоновано методичну основу оптимізації електричного поля полімерного прохідного ізолятора, дано аналітичний вираз для оцінки максимальної напруженості поля в ізоляційному проміжку струмопровід - фланець.

Ключові слова: струмопровід, прохідний ізолятор, фланець, напруженість поля.

The methodical basis for optimizing the electric field of polymer bushing An analytical expression for the evaluation of the maximum field strength in the insulating gap current lead - flange.

Keywords: Conductors, bushing, flange, the field strength.

УДК 621.311.1

Ю.В. ТОПОРОВА, асп., НТУ «ХПІ»;

А.П. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В работе рассмотрены теоретические основы определения и компенсации реактивной мощности для однофазных и трехфазных цепей.

Ключевые слова: реактивная мощность, несимметрия, несинусоидальность, компенсация, показатели качества электроэнергии.

Вступление. Интенсивный рост электрической нагрузки в бытовом секторе сопровождается повышением единичной мощности электроприемников, реактивной составляющей полной мощности, а также увеличением искажения формы токов и напряжения в электроэнергетической системе. Таким образом, для сетей электроснабжения бытовых потребителей возникает задача оптимальной компенсации реактивной мощности в таких условиях, что приведет к улучшению качества электроэнергии, сокращению потерь в сети и энергосистеме.

Цель исследований, постановка проблемы. Целью данной статьи является анализ методов определения и компенсации реактивной мощности для однофазных и трехфазных цепей в условиях несинусоидальности сигналов напряжений и токов.

Материалы исследований.

Теория энергетических процессов в цепях с несинусоидальными токами и напряжениями начинает развиваться после появления работ С. Vudeanu [1] и S. Fryze [2]. Рассмотрим основные определения реактивной мощности для однофазных систем. С. Vudeanu предложил следующее определение реактивной мощности:

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \varphi_n, \quad (1)$$

где U_n и I_n - среднеквадратические значения напряжения и тока гармоник n -порядка; φ_n - угол сдвига фаз между ними.

Основным преимуществом этого определения является то, что оно может применяться в цепях с произвольной формой сигналов. Основным недостатком является то, что реактивная мощность может быть скомпенсирована подключением индуктивных или емкостных компонентов для отдельных имеющихся гармоник.

© Ю. В.Топорова, А. П.Лазуренко, 2013

Определение, предложенное S. Fryze, основано на анализе мгновенных значений кривых напряжения и тока. Ток разделен на две части. Первая часть $i_a(t)$ представляет собой ток такой же формы волны и фазового угла, как и напряжение. Вторая составляющая тока является лишь остаточной частью, и обозначается $i_r(t)$. Эти два тока будут определяться уравнениями:

$$i_a(t) = \frac{P}{U^2} \cdot u(t), \quad (2)$$

где P – активная мощность; U – действующее значение напряжения; $u(t)$ – мгновенное значение напряжения

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t). \quad (3)$$

Причина такого разделения состоит в том, что ток $i_a(t)$ является током чисто активной нагрузки, который для того же напряжения будет развивать ту же мощность, что и исследуемая нагрузка. То есть, если ток $i_r(t)$ будет скомпенсирован, источник «увидит» чисто активную нагрузку, и коэффициент мощности будет равен единице. Можно показать, что токи $i_a(t)$ и $i_r(t)$ – ортогональные, среднеквадратические значения которых связаны таким образом

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2. \quad (4)$$

Кажущаяся мощность может быть получена как произведение среднеквадратических значений тока и напряжения

$$S^2 = U^2 I^2 = U^2 (I_a^2 + I_r^2) = P^2 + Q^2, \quad (5)$$

где Q – реактивная мощность по Fryze или «фиктивная мощность».

Преимуществом этого определения является то, что когда реактивная мощность сводится к нулю, коэффициент мощности будет равен единице. Основным недостатком является то, что сумма реактивных мощностей в узле энергетической системы не равна нулю, и Q_F не может вообще быть использована в расчетах потока мощности.

Определение реактивной мощности, предложенное N.L. Kusters и W.J.M. Moore [3], основано на анализе во временной области. Оно расширяет определение в соответствии с Fryze по дальнейшему разделению остаточного тока на два ортогональных компонента. Как произвести это разделение зависит от емкостного или индуктивного характера нагрузки. Три тока, полученные при этом разделении, называют: активным током, индуктивным или емкостным реактивным током и остаточным реактивным током, что приводит к кажущейся суммарной мощности

$$S^2 = P^2 + Q^2 = P^2 + Q_c^2 + Q_{cr}^2 = P^2 + Q_i^2 + Q_r^2. \quad (6)$$

По сравнению с разложением Fryze, определение реактивной мощности в соответствии с Kusters-Moore имеет то преимущество, что оно определяет часть тока, которая может быть скомпенсирована с помощью линейного конденсатора или индуктивности.

Определение реактивной мощности, предложенное W. Shepherd и P. Zakikhani [4], основано на частотном анализе. Гармоники тока и напряжения делятся на «общие» и «необщие» гармоники. Для общей гармоники порядка n напряжение U_n и ток I_n не равны нулю, а для необщей гармоники порядка n только одно из значений U_n и I_n отлично от нуля. Тогда кажущаяся мощность может быть определена как

$$S^2 = \left(\sum_{n \in N} U_n^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \right) \cdot \left(\sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right), \quad (7)$$

где N – множество всех общих гармонических порядков; M и P содержат все необщие отличные от нуля порядки гармоник напряжения и тока соответственно (т. е. M – множество порядков, на котором гармоники напряжения отличны от нуля, а соответствующие гармоники тока, из-за нелинейности, равны нулю).

Все кажущиеся компоненты мощности определяются с помощью среднеквадратических значений, ни один из них не имеет знака. Shepherd и др. считают, что их определение наиболее близко к физической реальности, особенно для компенсации реактивной мощности с максимальным коэффициентом мощности (с помощью пассивных компонентов).

Определение реактивной мощности, предложенное Sharon [5], основано на области частотного анализа. Это небольшое, но важное развитие вышеизложенного определения мощности. Оно начинается с такого же деления на общие и необщие гармонические составляющие см. формулу (7).

Sharon предлагает кажущийся компонент мощности:

$$S_Q^2 = U_{rms}^2 \sum_{n \in N} I_n^2 \sin^2 \varphi_n. \quad (8)$$

Кроме того, автор дает формулу для оптимального параллельно компенсирующего конденсатора и индуктивности, как

$$C_{opt} = \frac{1}{\omega} \frac{\sum_{n \in N} U_n n I_n \sin \varphi_n}{\sum_{n \in N \cup M} n^2 U_n^2}; \quad (9)$$

$$L_{opt} = \frac{1}{\omega} \frac{\sum_{n \in N \cup M} \frac{1}{n^2} U_n^2}{\sum_{n \in N} U_n \frac{1}{n} I_n \sin \varphi_n}. \quad (10)$$

Преимуществом данного определения является возможность скомпенсировать реактивные составляющие линейным конденсатором или линейной индуктивностью.

При анализе энергопроцессов в рассматриваемых сетях в последние годы предпочтение отдается не интегральным, а мгновенным теориям мощности. Наиболее перспективной в плане качества решения поставленной задачи является *pqr*-теория мощности, предложенная Н. Akagi, Y. Kanazava, A. Nabae [6]. Кросс-векторная теория рассматривает трехфазную систему с нулевым проводом. Мгновенную активную мощность трехфазной системы p можно записать как скалярное произведение векторов

$$p = u_s i_s, \quad (11)$$

где u_s и i_s - пространственные векторы напряжения и тока.

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c. \quad (12)$$

где u_a, u_b, u_c - фазные напряжения; i_a, i_b, i_c - фазные токи.

Согласно этой теории, вектор реактивной мощности q является результатом векторного произведения пространственных векторов напряжения и тока

$$q = u_s \times i_s. \quad (13)$$

Преимуществом этой теории является тот факт, что она предлагает расчет мощностей, которые линейно независимы друг от друга. Ввиду этого, три составляющие тока могут быть компенсированы тремя независимыми регуляторами с помощью пассивных элементов.

Основным недостатком данной теории является то, что при искаженных и несимметричных напряжениях сети некомпенсированной остается часть переменных составляющих в мгновенной активной и реактивной мощностях, даже при условии поддержания токов сети симметричными и синусоидальными.

Проблемами компенсации искажающих свойств потребителей электроэнергии занимался проф. НГУ «ХПИ» Кизилев В.У. [7, 8]. Автором был предложен метод измерения указанных функционалов и параметров и разработаны реализующие его средства измерения. Сущность метода состоит в том, что несинусоидальным процессам по основным энергетическим функционалам ставятся в соответствие синусоидальные процессы стабильной высокой частоты. Затем

измеряются все энергетические параметры этих эквивалентных синусоидальных процессов известными и достаточно простыми методами, которые еще упрощаются тем, что частота синусоидальных процессов неизменна. Фактически в предложенном методе осуществляется отображение пространства несинусоидальных сигналов в пространство синусоидальных сигналов.

Основой отображения пространств сигналов, так же как и основой любого измерения, является операция сравнения, которая заключается в сопоставлении основных энергетических функционалов исходных и эквивалентных сигналов. При этом если решается задача отображения сигналов в однофазной цепи переменного тока, необходимо поставить в соответствие исходным несинусоидальным сигналам $u(t)$ и $i(t)$ эквивалентные синусоидальные – $u_s(t)$ и $i_s(t)$ по действующим значениям и активной мощности. Для этого вводим понятия устройств сравнения функционалов сигналов: компараторы действующих значений и компаратор произведений.

Методы определения реактивной мощности для произвольной трехфазной цепи приведены в таблице.

Таблица – Методы определения реактивной мощности для трехфазной цепи

№	Метод
1	$Q = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c$
2	$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{U}_{bc} \dot{I}_a + \dot{U}_{ca} \dot{I}_b + \dot{U}_{ab} \dot{I}_c)$
3	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; S = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c$
4	$Q = \sqrt{U_a^2 I_a^2 - P_a^2} + \sqrt{U_b^2 I_b^2 - P_b^2} + \sqrt{U_c^2 I_c^2 - P_c^2}$
5	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; S = \sqrt{(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2) \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_0^2)}$
6	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; S = \sqrt{(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2 - U_0^2) \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_0^2)}$

где I_0, U_0 - ток и напряжение нулевой последовательности.

Метод 1 – классический метод определения реактивной мощности. Метод 2 реализован в индукционных счётчиках и широко применяется в электронных, но имеет методическую погрешность в несимметричных сетях. Методы 3 и 4 получили распространение в интеллектуальных трёхфазных счётчиках. Метод 5 точно отражает потери только при

симметричных напряжениях. Метод 6 – модификация метода 5 с целью повышения точности учета при несимметрии напряжений.

Проблема компенсации искажающих свойств потребителя электроэнергии теснейшим образом связана с оплатой за некомпенсированные дополнительные потери, осуществляемой сегодня по показаниям реактивного счетчика. Существующие реактивные счетчики измеряют только составляющую реактивной мощности, определяемую реактивным характером нагрузки, и не реагируют на другие ее составляющие, а потребитель не платит за дополнительные потери из-за этих причин.

Выводы. Множество существующих определений составляющих полной и реактивной мощностей дают различные результаты для одних и тех же энергетических процессов.

Объективной реальностью является множество методов определения и расчета реактивной мощности: метод обменной мощности, метод эквивалентных синусоид, частотные и интегральные методы; определение реактивной мощности с помощью векторных и функциональных пространств и т.д.

Отсутствие нормативной базы в части учета реактивной энергии позволяет производителям счетчиков применять любой метод ее вычисления, аттестуя счетчик в идеальных условиях, в то время как применение различных счетчиков на одной линии электропередач в реальных условиях ведет к существенному различию показаний, что неоднократно доводило до конфликтов между поставщиком и потребителем.

Существующие теории мощности предлагают алгоритмы компенсации высших гармоник активной, реактивной мощности, токов обратной и нулевой последовательности. Результативность их применения определяется как формой сигналов сети питания, так и параметрами и степенью нелинейности нагрузки. Рассмотренные методы компенсации не обеспечивают полную компенсацию высших гармоник мощности при несимметричных и несинусоидальных напряжениях сети питания и несимметрии и/или нелинейности параметров нагрузки.

Достижение необходимого баланса реактивной мощности в сетях позволяет во многих случаях улучшить качество электроэнергии, более экономично и на более высоком техническом уровне решить вопросы режимов регулирования напряжения, устойчивости и надежности системы.

Список литературы: 1. Budeany C. Reactive and fictitious powers / C. Budeany // Rumanian National Institute. – 1927. – W2. 2. Fryze S. Active, Reactive and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems / S. Fryze // Przegląd Electrot. – 1931. – No 7. – pp. 193-203 (in Polish). 3. Kusters N.L., Moore W.J.M. On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions /

N.L. Kusters, W.J.M. Moore // IEEE Trans. Pow. Appl. Syst., vol. PAS-99. – 1980. – pp. 1845-1854. 4. Shepherd W., Zakikhani P. Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems / W. Shepherd, P. Zakikhani // Proc. IEE. – 1972. – vol. 119, No 9, Sept. – pp. 1361-1362. 5. Sharon D. Reactive power definitions and power factor improvement in nonlinear systems / D. Sharon // Proc. Inst. Elect. Eng. – June 1973. – vol. 120. – pp. 704-706. 6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. IndAppl. – May/June 1984. – vol. 20. – pp. 625-630. 6. Кизилов В.У. Методы и средства измерения активной и реактивной мощности в трехфазных цепях / В.У. Кизилов // Приборы и системы управления. – 1985. – № 10. – С. 26-28. 8. Кизилов В.У. Новый метод измерения энергетических параметров несинусоидальных процессов / В.У. Кизилов, А.П. Лазуренко // Вестник ХПИ № Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика: Вып. № 5. – Харьков. – 2001. – С. 69-72.

Поступило в редколлегию 1.11.2012

УДК 621.311.1

Сравнительная характеристика методов определения реактивной мощности / Топорова Ю.В., Лазуренко А.П. // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 17 (990). – С.99-105. Бібліогр.: 8 назв. Табл.: 1.

В роботі розглянуті теорії компенсації реактивної потужності для однофазних і трифазних ланцюгів.

Ключові слова: реактивна потужність, несиметрія, несинусоїдальність, компенсація, показники якості електроенергії.

It is shown the theories of reactive power compensation for one-phase and three-phase electric circuit.

Keywords: reactive power, unsymmetrical conditions, nonsinusoidal conditions, the compensation, the indexes of the quality of the electric power.

УДК 621.3.027.2:621.3.0183

О.О. МИРОШНИК, канд. техн. наук., доц., ХНТУСГ, Харків

РІВНОМІРНИЙ РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕНЬ В МЕРЕЖІ 0,38/0,22 КВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Запропоновано метод рівномірного розподілу навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ. Проаналізовано типи нейронних мереж та запропоновано для розв'язання даної задачі узагальнено-регресійну нейронну мережу. Побудовано структуру нейронної мережі, яка дає рекомендації щодо рівномірного розподілу навантажень в мережі на основі статистичної інформації.

Ключові слова: несиметрія струмів, нейронна мережа, рівномірний розподіл споживачів

Постановка проблеми. З переходом України на ринкові відносини проблема якості та зниження втрат електроенергії досить гостро стоїть в енергетиці нашої держави. Протяжність розподільних мереж 0,4 – 150 кВ в Україну становить близько 1 млн. кілометрів, 50% з них припадає на мережі напругою 0,38/0,22 кВ. Середня зношеність мереж 0,22/0,38 кВ досягає 70%.

За даними Міністерства палива та енергетики втрати електричної енергії в окремих обленерго сягають до 20% від відпущеної електроенергії в мережу, а показники якості електроенергії перевищують допустимі ГОСТ 13109-97, який регламентує норми якості електричної енергії, в 2 – 4 рази. У європейських країнах вважається, що якщо втрати електроенергії перевищують 7 – 9 %, то така передача електричної енергії вважається неефективною. Тому виникла необхідність розробки нових методів та заходів по зниженню втрат та покращенню показників якості електричної енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як і до будь-якого товару до електричної енергії застосовується поняття «якості», яке нормується стандартом. Одним із вагомих показників якості електричної енергії в сільських мережах є несиметрія струмів та напруг. Основними факторами, які характеризують систему електропостачання, є вартість її спорудження, надійність і економічність передачі електроенергії споживачам. Численні дослідження, присвячені аналізу режимів роботи сільських мереж напругою до 0,38/0,22 кВ [1], показали, що несиметрія струмів обумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого складають нерівномірно розподілені по фазах однофазні електроприймачі, що мають випадковий характер комутації. Розрізняють два види несиметрії: систематичну і ймовірнісну або випадкову.

© О.О.Мірошник, 2013

Систематична несиметрія обумовлена постійним в часі нерівномірним навантаженням фаз, імовірна несиметрія відповідає навантаженням, які змінюються в часі випадково. Особливу увагу викликає систематична несиметрія, з якою можна боротися рівномірно розподіливши навантаження між фазами.

Мета статті. Створення нейронної мережі, яка б надавала рекомендації щодо рівномірного розподілу навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ.

Основні матеріали дослідження. Аналіз розвитку існуючих електричних мереж показує, що на сьогоднішній день розроблено велика кількість симетрувальних пристроїв, активних і пасивних фільтрів, але через свою низьку надійність і високу ціну вони не знайшли широкого застосування в мережах 0,38/0,22 кВ. Також становить велику проблему рівномірний розподіл однофазних споживачів між фазами, так як перефазування має здійснюватись на основі замірів значень фазних струмів ліній в період максимуму навантажень на підстанції два рази на рік. Але заміряні значення струму звичайно суттєво відрізняються від значень струму, які мають місце в інші моменти часу. Таким чином рівномірний розподіл фазних навантажень для даного моменту часу не гарантує оптимальність режиму в інші моменти часу, як за відхиленням напруги у споживачів, так і за величиною добових втрат електричної енергії в мережі. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати математичний апарат на основі нейронної мережі.

Головна особливість нейромережі полягає у паралельній обробці інформації всіма ланками, що дозволяє значно прискорити процес обробки інформації. При великій кількості з'єднань мережа стає більш надійною навіть при пошкодженнях зв'язків між нейронами. Також нейронні мережі здатні до навчання та узагальнення накопичених знань. Нейронна мережа має риси штучного інтелекту. Натренована на обмеженій кількості даних мережа здатна узагальнювати отриману інформацію й показувати гарні результати на даних, що не використовувалися при її навчанні [2]. Таким чином навчена нейронна мережа на основі передісторії може давати досить точні рекомендації щодо перефазування споживачів.

На даний час нейронні мережі використовуються для розв'язку цілого ряду задач, однією з яких є задача прогнозування. Нехай задані n дискретних відліків $\{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)\}$ у послідовні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n . Тоді завдання прогнозування полягає в передбаченні значення $y(t_{n+1})$ у деякий майбутній момент часу t_{n+1} . Метою прогнозування є зменшення ризику при прийнятті рішень. Прогноз звичайно виходить помилковим, але помилка залежить від прогнозуючої системи. Надаючи прогнозу

більше ресурсів, можна збільшити точність прогнозу й зменшити збитки, пов'язані з невизначеністю при прийнятті рішень.

У даній статті пропонується застосування нейронної мережі для розв'язку завдання прогнозування часових рядів. Користувач вибирає довільний часовий ряд, що містить N відліків, наприклад, фазних струмів на головній ділянці лінії, і розбиває його на три множини: навчальну, тестувальну та контрольну вибірки, які потім подаються на вхід мережі. Результатом прогнозування є значення часового ряду в необхідний момент часу. Для підвищення якості прогнозу необхідно зробити попередню обробку інформації. Оскільки часовий ряд являє собою послідовність числових відліків, попередня обробка зводиться до масштабування значень відліків з метою їх приведення в єдиний діапазон. Кожна вибірка являє собою дискретну функцію, задану в точках на інтервалі $[0, N]$ з кроком 1, де N - максимальне значення аргументу цієї функції.

При розв'язанні задач прогнозування роль нейронної мережі полягає в передбаченні майбутньої реакції системи за її попередньою поведінкою. Володіючи інформацією про значення змінної x у моменти, попередні прогнозуванню $x_{(k-1)}, x_{(k-2)}, \dots, x_{(k-n)}$, мережа виробляє розв'язок, яким буде найбільш імовірне значення послідовності $x_{(k)}$ у теперішній момент k . Для адаптації ваг коефіцієнтів мережі використовуються фактична похибка прогнозування $\varepsilon = x_{(k)} - \hat{x}_{(k)}$ і значення цієї похибки в попередні моменти часу [3].

При виборі архітектури мережі звичайно випробовується декілька конфігурацій з різною кількістю елементів. Виходячи з того, що задача прогнозування є окремим випадком завдання регресії, впливає, що вона може бути вирішена такими типами нейронних мереж: багатошаровим перцептроном, радіально-базисною мережею, узагальнено-регресійною мережею, мережею Вольтеррі та мережею Ельмана.

При розв'язанні задачі рівномірного розподілення споживачів у якості нейронної мережі була обрана узагальнено-регресійна мережа, що реалізує методи ядерної апроксимації. У задачах регресії вихід мережі може розглядатися як очікуване значення моделі в даній точці простору входів. Це очікуване значення пов'язане з густиною імовірності спільного розподілу входних і вихідних даних. У точці розташування кожного навчального спостереження міститься гауссова ядерна функція. Вважається, що кожне спостереження свідчить про деяку впевненість у тому, що поверхня відгуку в даній точці має певну висоту, і ця впевненість знижується при відході убик від точки. Узагальнено-регресійна мережа копіює усередину себе всі навчальні спостереження та використовує їх для оцінки відгуку в довільній точці. Залишкова вихідна оцінка мережі виходить як зважене середнє виходів за усіма навчальними

спостереженнями, де значення ваг відбивають відстань від цих спостережень до тієї точки, в якій проводиться оцінювання. Структура узагальнено-регресійної нейронної мережі представлено на рис. 1.

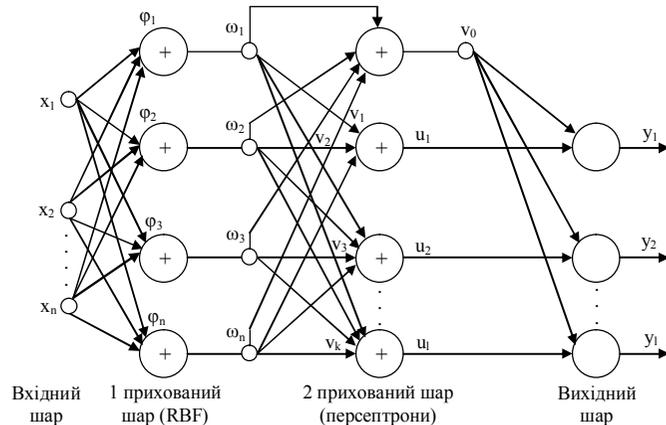


Рис. 1 – Структура узагальнено-регресійної нейронної мережі

Узагальнено-регресійна мережа має два приховані шари: шар радіальних елементів і шар елементів, які формують зважену суму для відповідного елемента вихідного шару. У вихідному шарі визначається зважене середнє шляхом розподілу зваженої суми на суму ваг. У якості радіальної функції застосовується функція Гаусса. Вхідний шар передає сигнали на перший проміжний шар нейронів, що є радіально симетричними. Вони несуть у собі інформацію про дані навчальних випадків або ж їх кластерів і передають її в другий проміжний шар. У ньому формуються зважені суми для всіх елементів вихідного шару й сума ваг, що обчислюється спеціальним елементом. Якщо позначити вихід i -го нейрона радіально-базисного мережевого шару як v_i , то вихідний сигнал i -го нейрона другого проміжного шару обчислюється за виразом

$$u_i = \sum_{i=1}^k v_i, \quad (1)$$

де k - число нейронів в радіально-базисному мережевому шарі.

Позначивши тепер вагові коефіцієнти i -го нейрона в радіально-базисному мережевому шарі як ω_i , одержимо вираз для суми ваг:

$$v_0 = \sum_{i=1}^k \omega_i, \quad (2)$$

Отже, вихідний шар ділить зважені суми на суму ваг і видає остаточний прогноз. Позначивши його y_l , одержимо:

$$y_l = \frac{u_i}{v_0}. \quad (3)$$

Розглянемо тепер принципи функціонування першого проміжного шару, структура якого представлено на рис. 2.

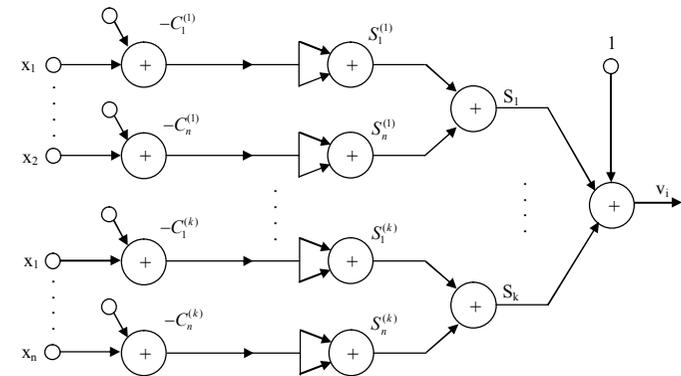


Рис. 2 – Структурна схема функціонування першого проміжного шару

На вхід радіальних елементів із вхідного шару подається вектор x . Базисні функції радіально-базисного шару задаються матрицею Q , але в практичному плані більш зручно використовувати для опису елементів матрицю кореляції C , яку можна отримати із матриці Q у такий спосіб:

$$C = Q^T \cdot Q, \quad (4)$$

Центр i -го нейрона радіального шару позначимо як c_i .

Залишковий результат обробки вхідних сигналів S_j обчислюється за формулами:

$$S_j^{(t)} = -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^n (x_t - c_i^{(t)})^2, \quad (5)$$

$$S_t = \sum_{j=1}^n S_j^{(t)}, \quad (6)$$

$$v_i = \sum_{t=1}^k \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{S_t}{\sigma_t^2}\right) \omega_t. \quad (7)$$

Потім вектор вихідних сигналів v передається на вхід другого проміжного шару мережі.

Перевагою узагальнено-регресійної нейронної мережі можна вважати визначеність структури: мережа фактично вміщує в себе всі навчальні дані. З іншого боку, така структура нейромережі є і її найбільшим недоліком: при великому обсязі навчальних даних швидкість роботи мережі падає, іноді дуже суттєво, через помітне збільшення складності архітектури.

Вихідне значення мережі має імовірнісний вигляд, тому його легше інтерпретувати. При невеликому обсязі вхідних даних мережа дуже швидко навчається. Навчання мережі необхідно виконувати окремо для кожного часового ряду, тому що спроба прогнозування рядка, на якому мережа не була навчена, приведе до помилкового результату [3].

Враховуючи вищесказане побудуємо структуру нейронної мережі для рівномірного розподілення навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ. Вхідними сигналами мережі будуть струми фаз, а вихідними – рекомендації по рівномірному розподіленню навантажень в мережі (рис. 3).

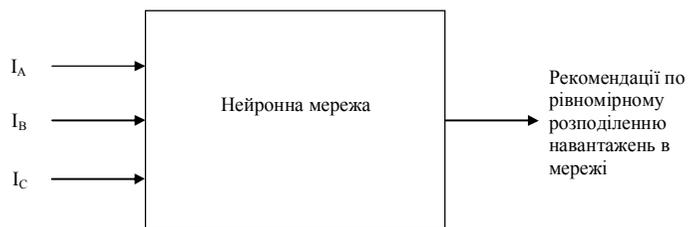


Рис. 3 – Нейронна мережа для рівномірного розподілення навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ

Кінцева мета вимірювання показників якості електроенергії – це прийняття відповідних заходів щодо їх поліпшення. В даний час відповідно до ПТЕЕ [4] вирівнювання електричних навантажень трансформаторів і головних ділянок ліній 0,38 кВ проводиться монтерським бригадами на підставі результатів вимірювань струмів у фазах в період найбільших навантажень. Якщо в проводах головних ділянок або на шинах 0,4 кВ трансформатора

$$I_A \neq I_B \neq I_C, \quad (8)$$

то після перерозподілення однофазних споживачів між фазами навантаження стає більш-менш рівномірним, тобто:

$$I_A \approx I_B \approx I_C. \quad (9)$$

Як правило, вирівнювання електричних навантажень цим і обмежується. Однак оскільки вмикання або вимикання будь-якого приймача є рівноймовірним і сумарне навантаження підпорядковується статистичним закономірностям, – непридатність симетрування за

струмами, які мають місце в даний момент часу, навіть в період найбільших навантажень, очевидна.

В зв'язку з цим пропонується використовувати нейронну мережу, яка враховує зміну навантажень споживачів у часі і дає можливість виконати рівномірний розподіл навантажень по фазах на інших принципах. При цьому рекомендації по передднанню того чи іншого споживача з максимально навантаженої фази до найменш навантаженої буде давати нейронна мережа на підставі передісторії накопичених даних. На рис. 4 представлено нейронну мережу для створення стратегії рівномірного розподілення навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ.

Запропонована нейронна мережа на основі зняття та аналізу добових графіків навантажень за півроку дає рекомендації, на яку величину струму необхідно перерозподілити на ту чи іншу фазу. Крім того нейронна мережа для виділення режиму максимуму навантаження від інших значень струму добового графіка навантаження електропередачі, використовує тільки ті значення струму, які знаходяться в діапазоні $[-\sigma(I_{max}); \sigma(I_{max})]$ (рис. 5).

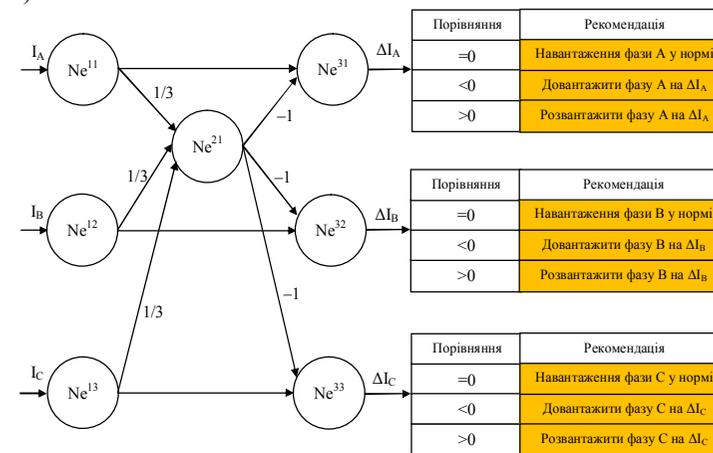


Рис. 4 – Нейронна мережа для створення стратегії рівномірного розподілення навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ

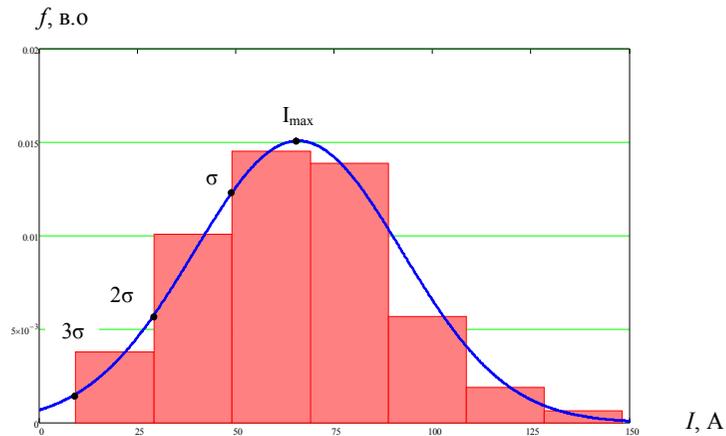


Рис. 5 – Закон розподілення струмів в мережі

Висновок. Використання нейронної мережі для рівномірного розподілення навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ дозволить підвищити достовірність прийняття рішення персоналу монтерської бригади.

Список літератури: 1. Левин М.С., Лецинская Т.Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ. – Электричество, 1999, №5. – С. 18 – 22. 2. Суровцев И.С., Клюкин В.И., Пивоварова Р.П. Нейронные сети. – Воронеж: ВГУ, 1994. – 224 с. 3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. – М.: Мир, 1992. 4. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів – Наказ Міністерства палива та енергетики України від 25 липня 2006 р. № 258.

Поступила в редколлегию 08.10.2012

УДК 621.3.027.2:621.3.0183

Рівномірний розподіл навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ з використанням нейронної мережі / Мірошник О.О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.106-114. Бібліогр.: 4 назв. Іл.: 5.

Предложен метод равномерного распределения нагрузок в сети 0,38/0,22 кВ. Проанализированы типы нейронных сетей и предложены для решения данной задачи обобщенно-регрессионная нейронная сеть. Построено структуру нейронной сети, которая дает рекомендации относительно равномерного распределения нагрузок в сети на основе статистической информации.

Ключевые слова: несимметрия токов, нейронная сеть, равномерное распределение потребителей

A method of uniform load distribution in the network 0.38 / 0.22 kV. Analyzed the types of neural networks and proposed to tackle this problem of generalized regression neural network. Built the structure of the neural network, which provides guidance on the uniform distribution of loads in the network based on statistical information.

Keywords: current unbalance, neural network, a uniform distribution of consumers.

УДК 621. 313.3

Н.В.РУДЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
М.Ф. ПІСКУРЬОВ, доц., НТУ «ХПІ».

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ФАЗНИХ КООРДИНАТАХ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

В статті розглянуто реалізація математичної моделі синхронного генератора в середовищі Matlab.

Ключові слова: математична модель, синхронний генератор

Постановка проблеми. Сучасні комп'ютерні технології, в основі яких лежать прикладні пакети, дають можливість більш глибокого вивчення питань, пов'язаних з процесами в електричних системах. Інструментом дослідження перехідних процесів в електричних системах може слугувати програма Matlab. Для дослідження процесів в електричній системі за допомогою цієї програми необхідно в середовищі Matlab створити комп'ютерну модель елементів електричної системі на базі їх математичних моделей. При моделюванні процесів в синхронному генераторі використовують або математичну модель в фазних координатах або в dq координатах. В статті розглянуто математичну модель синхронного генератора в фазних координатах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботах [1, 2] наведений класичний вигляд математичної моделі синхронного генератора. Рівняння балансу напруг записується як

$$\left. \begin{aligned} u_s &= -\frac{d\psi_s}{dt} - r_s i_s, s = \{A, B, C\} \\ u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 &= \frac{d\psi_{1k}}{dt} + r_{1k} i_{1k}, k = \{d, q\} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

де r_A, r_B, r_C – активний опір обмоток статора r_{st} фази А, В, С відповідно; r_f – активний опір обмотки збудження; r_{1d}, r_{1q} – активний опір обмоток ротора по продольній та поперечній осям відповідно; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_{1d}, \psi_{1q}, \psi_f$ – потокозчеплення статорних обмоток, роторних обмоток по відповідним осям та обмотки збудження;

© Н.В.Рудевич, М.Ф.Піскурьов, 2013

$i_A, i_B, i_C, i_d, i_q, i_f$ – струми в статорних обмотках фаз А, В, С відповідно, роторних обмотках по відповідним осям та в обмотці збудження; u_A, u_B, u_C, u_f – напруга в статорних обмотках фаз А, В, С відповідно та напруга, що підведена до обмотки збудження.

Потокозчеплення кожної обмотки записується як добуток струмів на відповідні індуктивності та взаємоіндуктивності

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + M_{Ad} i_d + M_{Aq} i_q \\ \Psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + M_{Bd} i_d + M_{Bq} i_q \\ \Psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + M_{Cd} i_d + M_{Cq} i_q \\ \Psi_f &= M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f + M_{fd} i_d \\ \Psi_d &= M_{dA} i_A + M_{dB} i_B + M_{dC} i_C + M_{df} i_f + L_d i_d \\ \Psi_q &= M_{qA} i_A + M_{qB} i_B + M_{qC} i_C + L_q i_q \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

В машині, що обертається тільки індуктивності L_f, L_d, L_q можна вважати незмінними. Всі інші L та M залежать від положення ротора відносно обмоток статора, а, отже, є функціями часу

$$\left. \begin{aligned} L_s &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{ss} &= m_0 + m_2 \cos 2(\gamma + \alpha), s = \{BC, AB, AC\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{sf} &= M_d \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{ds} &\cong M_d \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \\ M_{qs} &= M_q \cos(\gamma + \alpha), s = \{A, B, C\}, \alpha = \left\{0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right\} \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

де l_0, m_0 — постійні складові відповідних індуктивностей; l_2, m_2 — амплітуди других гармонік тих же індуктивностей; γ – кут між магнітною оссю фази А та продольною оссю d , $\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$ (ω_0 – синхронна кутова швидкість обертання поля статора), l_0 та m_0, l_2 та m_2 виражаються через індуктивності, якими звичайно характеризується синхронна машина

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0), l_2 = m_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q), m_0 = \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right), \quad (1.4)$$

де в відносних одиницях $L_d = X_d; L_q = X_q; L_0 = X_0$.

Системи рівнянь 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 представляють математичну модель явнопольного синхронного генератора з урахуванням демпферних обмоток в режимі холостого ходу, коли фазні струми дорівнюють нулю $i_A = 0, i_B = 0, i_C = 0$. В навантаженому режимі ця модель повинна бути доповнена системою рівнянь, які відображають залежність струму статорних обмоток фаз А, В, С від відповідних напруг. Наприклад, при статичному симетричному навантаженні, що носить активно-індуктивний характер, залежність між струмом навантаження та напругою генератора має вигляд

$$u_s = r_{нав} i_s + \frac{di_s}{dt} L_{нав}, \quad (1.5)$$

де $r_{нав}$ – активний опір навантаження фази; $L_{нав}$ – індуктивність навантаження фази, $L_{нав} = L_{вл} - M_{вз}$ ($L_{вл}$ – власна індуктивність фази, $M_{вз}$ – взаємоіндуктивність між фазами).

При відсутності демпферних обмоток у генератора останнє рівняння в системі (1.1) та два останні рівняння в системі (1.2) і (1.3) будуть відсутні. У випадку неявнопольного генератора, при умові його електричної симетрії, модель буде спрощена за рахунок того, що $L_d = L_q$, а, отже,

$$L_A = L_B = L_C = l_0 \quad \text{та} \quad M_{AB} = M_{AC} = M_{CB} = M_{BA} = M_{CA} = M_{BC} = m_0. \quad (1.7)$$

Мета статті. Побудова математичної моделі явнопольного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора для створення відповідної комп'ютерної моделі в середовищі Matlab.

Основні матеріали досліджень. Для створення комп'ютерної моделі явнопольного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора зручно використовувати наступний вигляд математичної моделі синхронного генератора.

Струм в обмотці збудження визначається згідно з рівнянням

$$\frac{1}{\omega_0} \frac{di_f}{dt} L_f + r_f i_f = u_f - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C)}{dt}. \quad (1.8)$$

Електрорушійна сила кожної фази визначається згідно з системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} e_A &= -\frac{d(M_{Af}i_f)}{dt} \\ e_B &= -\frac{d(M_{Bf}i_f)}{dt} \\ e_C &= -\frac{d(M_{Cf}i_f)}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (1.9)$$

Похідна потокозчеплення кожної обмотки фаз має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} &= e_A - \frac{d(L_A i_A)}{dt} - \frac{d(M_{AB} i_B)}{dt} + \frac{d(M_{AC} i_C)}{dt} \\ \frac{d\psi_B}{dt} &= e_B - \frac{d(L_B i_B)}{dt} - \frac{d(M_{BA} i_A)}{dt} + \frac{d(M_{BC} i_C)}{dt} \\ \frac{d\psi_C}{dt} &= e_C - \frac{d(L_C i_C)}{dt} - \frac{d(M_{CA} i_A)}{dt} + \frac{d(M_{CB} i_B)}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (1.10)$$

Баланс напруг на шинах генератора кожної фази визначається згідно з системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_A &= -\frac{d\psi_A}{\omega_0 dt} - r i_A \\ u_B &= -\frac{d\psi_B}{\omega_0 dt} - r i_B \\ u_C &= -\frac{d\psi_C}{\omega_0 dt} - r i_C \end{aligned} \right\}. \quad (1.11)$$

Струм статора кожної фази генератора реалізується у вигляді системи

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \int \frac{e_A - \left(\frac{dL_A}{\omega_0 dt} + r_{\text{нав}} + r_{st}\right) i_A - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{AB} i_B)}{dt} - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{AC} i_C)}{dt}}{(L_A + L_{\text{нав}}) / \omega_0} \\ i_B &= \int \frac{e_B - \left(\frac{dL_B}{\omega_0 dt} + r_{\text{нав}} + r_{st}\right) i_B - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{BA} i_A)}{dt} - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{BC} i_C)}{dt}}{(L_B + L_{\text{нав}}) / \omega_0} \\ i_C &= \int \frac{e_C - \left(\frac{dL_C}{\omega_0 dt} + r_{\text{нав}} + r_{st}\right) i_C - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{CA} i_A)}{dt} - \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M_{CB} i_B)}{dt}}{(L_C + L_{\text{нав}}) / \omega_0} \end{aligned} \right\}. \quad (1.12)$$

Всі значення параметрів моделі визначаються в відносних одиницях при номінальних умовах, окрім часу t , який виражається в секундах, для

відображення процесу в реальному часі. Отримання часу в секундах досягається шляхом домноження часу, який виражається в формулах в радіанах, на кутову швидкість ω_0 , що має одиниці виміру радіан на секунду ($\omega_0=314$ рад/сек).

Важливою задачею є приведення паспортних параметрів синхронного генератора до параметрів моделі, що виражаються в відносних одиницях при номінальних умовах, наведених до обмотки статора.

Висновки. За допомогою наведеної математичної моделі можна створити комп'ютерну модель синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора.

Список літератури. 1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 520с. 2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах / Ю.А. Куликов. – М.: Мир. - 2003. - 183с.

Поступила в редколлегию 30.09.2012.

УДК 621.314

Математична модель синхронного генератора в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів в середовищі Matlab / Рудевич Н.В., Піскурьов М.Ф. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - №.17 (990). – С. 114-118. Бібліогр.: 2 назви.

В статье рассмотрено реализацию математической модели синхронного генератора в среде Matlab.

Ключевые слова: математическая модель, синхронный генератор.

In the article it is considered realization of mathematical model of synchronous generator in an environment Matlab.

Keywords: mathematical model, synchronous generator

Г.А. СЕНДЕРОВИЧ, д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
П.Г. ЩЕРБАКОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛЕВОГО УЧАСТИЯ СУБЪЕКТОВ В НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

В работе проведены исследования методической погрешности определения долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений, вызванной ошибкой в оценке сопротивления связи с системой.

Ключевые слова: качество электрической энергии, нарушение симметрии напряжений, долевого участия субъектов, сопротивления связи с системой.

Постановка задачи и анализ публикаций. Последние годы в Украине большое внимание уделяется вопросам качества электроэнергии (КЭ). Детерминированное определение долевого участия субъектов распределения и потребления электрической энергии в нарушении ее качества позволяет автоматизировать процесс определения ответственности, и, тем самым, повысить заинтересованность потребителей и поставщиков в соблюдении требований ГОСТ [1] к показателям качества электроэнергии (ПКЭ). Одним из основных требований по КЭ является обеспечение симметрии напряжений, которое характеризуется двумя ПКЭ: коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} и коэффициентом несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} .

Те же проблемы актуальны в других странах СНГ, где состояние электрических сетей и электрооборудование потребителей традиционно не учитывает многих требований, необходимых для поддержания КЭ в системах электроснабжения. Поэтому, Госэнергонадзором министерства энергетики Российской Федерации утвержден метод определения фактического вклада субъекта, имеющего искажающие приемники, обусловившие несоответствие ПКЭ [2].

В основе метода в части его применения к несимметричным режимам лежит определение источника искажений симметрии по направлению активной мощности обратной последовательности. Но этот метод не дает детерминированного решения и может давать большую погрешность в определении долевого участия потребителей в нарушении симметрии на сборных шинах.

© Г.А. Сендерович, П.Г. Щербакова, 2013

В разработках украинских ученых найдены решения, близкие к детерминированным. Предложен метод определения долевого участия субъектов в нарушениях симметрии напряжений на границе раздела балансовой принадлежности (ГРБП), использующий параметрический подход для модели, выполненной в фазных координатах [3, 4]. При определении долевого участия в нарушении симметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}) метод обеспечивает определение долевого участия потребителей без методических погрешностей. В случае определения долевого участия в нарушении симметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) должно быть учтено влияние системы. Это выполняется путем расчета коэффициентов участия обобщенной нагрузки ($K_{2_{уч\Sigma}}$) и системы ($K_{2_{уч\text{сист}}}$) в искажении симметрии по обратной последовательности на сборных шинах по формулам

$$K_{2_{уч\Sigma}} = \frac{K_{2U}''}{K_{2U}' + K_{2U}''}; K_{2_{уч\text{сист}}} = \frac{K_{2U}'}{K_{2U}' + K_{2U}''}, \quad (1)$$

где K_{2U}' – составляющая коэффициента несимметрии на ГРБП, определяемая системой; K_{2U}'' – составляющая коэффициента несимметрии на ГРБП, определяемая нагрузкой.

Определение K_{2U}' и K_{2U}'' требует введения сопротивления связи (Z_C) между ГРБП и ЭДС системы. При подключении потребителей к мощной энергосистеме обычно принимают, что Z_C равно сопротивлению понижающего трансформатора. В общем случае Z_C является величиной расчетной (эквивалентной), поэтому могут иметь место неточности по его оценке.

Целью статьи является оценка влияния ошибки задания сопротивления связи с системой на определение долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений на ГРБП.

Основной материал исследований. На математической модели [5] проведены опыты, в которых определены зависимости от погрешности введения сопротивления связи ΔZ_C следующих параметров [6]: коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} на ГРБП; коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, создаваемого системой на ГРБП K_{2U}' ; коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой на ГРБП K_{2U}'' ; коэффициента участия системы в создании несимметрии на ГРБП $K_{2_{уч\text{сист}}}$ и коэффициента участия нагрузки в создании несимметрии на ГРБП $K_{2_{учн}}$.

Для обеспечения возможности приведения погрешностей, полученных в разных опытах, к одинаковым условиям опыты выполнены при условии постоянства суммы коэффициентов K_{2U}'' и K_{2U}' ($K_{2U}'' + K_{2U}' = 0,3$). В качестве факторов несимметрии в системе использованы изменения амплитуды фазного напряжения U_A , у потребителя – модуля сопротивления нагрузки фазы $Z_{нА}$. Регулирование факторов несимметрии в модели осуществляется через коэффициенты f, k :

$$\underline{U}_A = \underline{U}_A - f \cdot \Delta U; \underline{Z}_{нА} = \underline{Z}_{нА} - k \cdot \Delta Z_{нА}.$$

Ошибка определения сопротивления связи вводится в модель через коэффициент d : $\underline{\Delta Z}_C = d \cdot \underline{\Delta Z}_C$. Диапазон изменения погрешностей составляет $\pm 50\%$. Результаты опытов сведены в табл. 1. Изменения показателей несимметрии в зависимости от относительной погрешности ΔZ_C^* проиллюстрированы на рис. 1. Как видно из приведенных графиков, значения коэффициентов участия системы $K_{2уч\ сист}$ и нагрузки $K_{2уч н}$ в создании несимметрии на сборных шинах заметно зависят от сопротивления связи. Представляет интерес точность определения участия субъектов в нарушении симметрии по обратной последовательности. С этой целью выполнены расчеты погрешностей коэффициента участия системы – $\Delta K_{2уч\ сист}$ и погрешности его составляющих – $\Delta K_{2U}''$ и $\Delta K_{2U}'$ (табл. 2) в функции от ΔZ_C^* . Погрешности коэффициента участия системы приведены к сумме коэффициентов участия:

$$\Delta K_{2уч\ сист} = \frac{K_{2уч\ сист} - K_{2уч\ сист}(0)}{K_{2уч\ сист} + K_{2уч н}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где в силу условия для коэффициентов участия [5]

$$K_{2уч\ сист} + K_{2уч н} = 1.$$

Погрешности коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП, – K_{2U}' и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП, – K_{2U}'' приведены в соответствии к их сумме:

$$\Delta K_{2U}' = \frac{K_{2U}' - K_{2U}'(0)}{K_{2U}' + K_{2U}''} \cdot 100\%; \Delta K_{2U}'' = \frac{K_{2U}'' - K_{2U}''(0)}{K_{2U}' + K_{2U}''} \cdot 100\%. \quad (4)$$

В диапазоне изменения ошибки сопротивления связи $\Delta Z_C^* = \pm 50\%$ погрешность определения участия системы $\Delta K_{2уч\ сист}$ составляет от $-23,2\%$ до $30,7\%$ (рис. 2). Погрешность в оценке участия субъектов приблизительно в два раза ниже, чем ошибка задания сопротивления связи.

Таблица 1 – Изменение параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от ΔZ_C^*

$K_{2уч\ сист}(0)$	Параметры	ΔZ_C^*											
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
1	K_{2U}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	K_{2U}'	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	K_{2U}''	0,021	0,016	0,012	0,008	0,004	0,0	0,002	0,008	0,012	0,016	0,02	0,02
	$K_{2уч\ сист}$	0,936	0,948	0,961	0,974	0,987	1,0	0,987	0,974	0,962	0,95	0,938	0,938
	$K_{2уч\Sigma}$	0,064	0,052	0,039	0,026	0,013	0,0	0,013	0,026	0,038	0,05	0,062	0,062
0,75	K_{2U}	0,253	0,258	0,262	0,266	0,27	0,274	0,277	0,28	0,284	0,286	0,289	0,289
	K_{2U}'	0,201	0,207	0,212	0,216	0,221	0,225	0,229	0,233	0,236	0,24	0,243	0,243
	K_{2U}''	0,094	0,09	0,086	0,082	0,079	0,075	0,071	0,068	0,064	0,06	0,057	0,057
	$K_{2уч\ сист}$	0,682	0,696	0,71	0,724	0,737	0,75	0,762	0,775	0,787	0,799	0,81	0,81
	$K_{2уч\Sigma}$	0,312	0,304	0,29	0,276	0,263	0,25	0,238	0,225	0,213	0,201	0,19	0,19
0,5	K_{2U}	0,222	0,233	0,242	0,25	0,258	0,265	0,272	0,278	0,283	0,289	0,293	0,293
	K_{2U}'	0,093	0,106	0,119	0,13	0,14	0,15	0,159	0,167	0,175	0,182	0,189	0,189
	K_{2U}''	0,166	0,163	0,16	0,156	0,153	0,15	0,147	0,143	0,14	0,137	0,134	0,134
	$K_{2уч\ сист}$	0,359	0,395	0,426	0,454	0,478	0,5	0,52	0,538	0,555	0,57	0,585	0,585
	$K_{2уч\Sigma}$	0,641	0,605	0,574	0,546	0,522	0,5	0,48	0,462	0,445	0,43	0,415	0,415
0,25	K_{2U}	0,21	0,226	0,24	0,253	0,264	0,274	0,283	0,291	0,298	0,305	0,311	0,311
	K_{2U}'	0,022	0,004	0,023	0,042	0,059	0,075	0,089	0,102	0,114	0,125	0,135	0,135
	K_{2U}''	0,239	0,236	0,233	0,231	0,228	0,225	0,222	0,22	0,217	0,214	0,212	0,212
	$K_{2уч\ сист}$	0,084	0,018	0,091	0,155	0,207	0,25	0,286	0,317	0,344	0,368	0,389	0,389
	$K_{2уч\Sigma}$	0,916	0,982	0,909	0,845	0,793	0,75	0,714	0,683	0,656	0,632	0,611	0,611
0	K_{2U}	0,222	0,243	0,261	0,276	0,289	0,3	0,31	0,319	0,326	0,333	0,34	0,34
	K_{2U}'	0,138	0,103	0,072	0,045	0,021	0,0	0,019	0,037	0,053	0,067	0,08	0,08
	K_{2U}''	0,311	0,308	0,306	0,304	0,302	0,3	0,298	0,296	0,294	0,292	0,289	0,289
	$K_{2уч\ сист}$	0,307	0,25	0,191	0,13	0,066	0,0	0,061	0,111	0,152	0,187	0,217	0,217
	$K_{2уч\Sigma}$	0,693	0,75	0,809	0,87	0,934	1,0	0,939	0,889	0,848	0,813	0,783	0,783

Таблица 2 – Погрешности параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от ΔZ_C

$K_{2 \text{ уч сист}}(0)$	Погрешности параметров	ΔZ_C^*										
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	$\Delta K'_{2U}, \%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	7,0	5,33	4,0	2,67	1,33	0,0	0,67	2,67	4,0	5,33	6,67
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	6,4	5,2	3,9	2,6	1,3	0,0	1,3	2,6	3,8	5,0	6,2
0,75	$\Delta K'_{2U}, \%$	-8,0	-6,0	-4,33	-3,0	-1,33	0,0	1,33	2,67	3,67	5,0	6,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	6,33	5,0	3,67	2,33	1,33	0,0	-1,33	-2,33	-3,67	-5,0	-6,0
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	-6,8	-5,4	-4,0	-2,6	-1,3	0,0	1,2	2,5	3,7	4,9	6,0
0,5	$\Delta K'_{2U}, \%$	-19,0	-14,7	-10,3	-6,7	-3,3	0,0	3,0	5,7	8,3	10,7	13,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	6,3	4,3	3,3	2,0	0,1	0,0	-0,1	-0,23	-3,3	-4,3	-5,3
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	-14,1	-10,5	-7,4	-4,6	-2,2	0,0	2,0	3,8	5,5	7,0	8,5
0,25	$\Delta K'_{2U}, \%$	-17,6	-23,6	-17,3	-11,0	-5,33	0,0	4,67	9,0	13,0	16,7	20,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	4,67	3,67	2,67	2,0	1,0	0,0	-1,0	-1,67	-2,67	-3,67	-4,33
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	-16,6	-23,2	-15,9	-9,5	-4,3	0,0	3,6	6,7	9,4	11,8	13,9
0	$\Delta K'_{2U}, \%$	46,0	34,3	24,0	15,0	7,0	0,0	6,33	12,3	17,7	22,3	26,7
	$\Delta K''_{2U}, \%$	3,67	2,67	2,0	1,33	0,67	0,0	-0,67	-1,33	-2,0	-2,67	-3,67
	$\Delta K_{2 \text{ уч сист}}, \%$	30,7	25,0	19,1	13,0	6,6	0,0	6,1	11,1	15,2	18,7	21,7

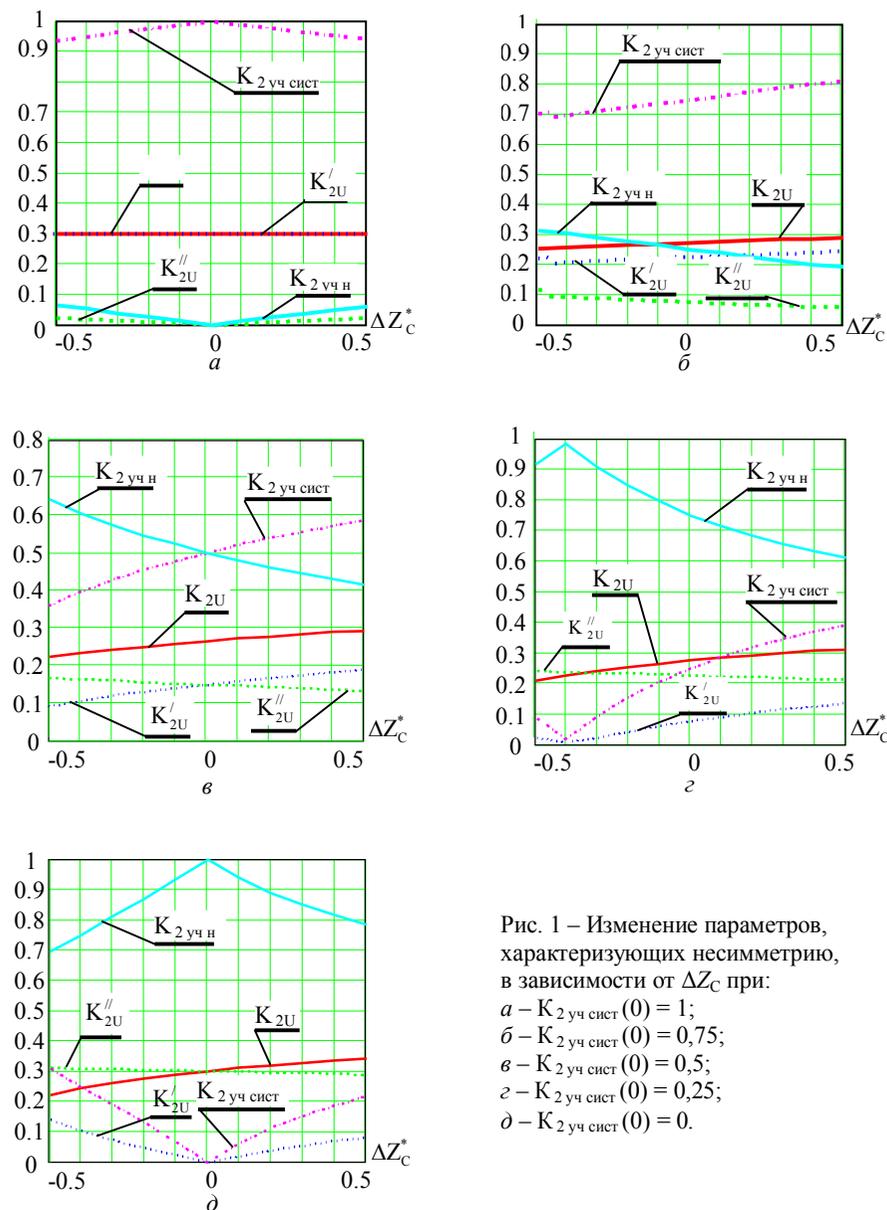


Рис. 1 – Изменение параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от ΔZ_C при:
 а – $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 1$;
 б – $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,75$;
 в – $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,5$;
 г – $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,25$;
 д – $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0$.

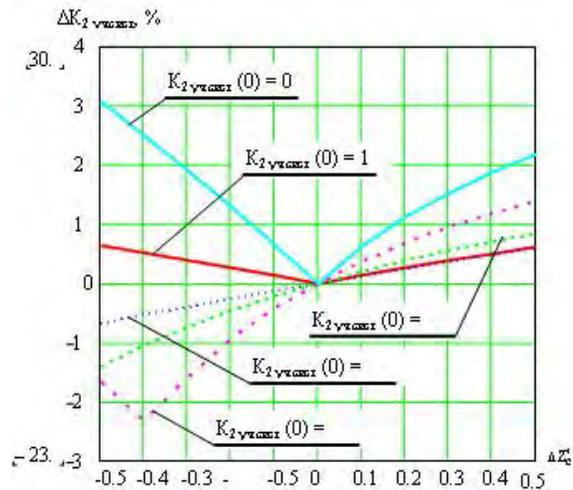


Рис. 2 – Зависимость погрешности расчета коэффициентов участия от ошибки задания сопротивления связи

Рассмотрим, чем определяются погрешности коэффициентов участия. Для этого сопоставим в функции от ΔZ_C^* изменения $\Delta K_{2уч сист}$ с изменениями погрешностей коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП, – $\Delta K'_{2U}$, и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП, – $\Delta K''_{2U}$, (рис. 3).

Из графиков следует, что погрешности возрастают по мере увеличения участия нагрузки в нарушении симметрии по обратной последовательности. Характер изменения погрешности $\Delta K_{2уч сист}$ определяется, в основном, погрешностью коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой – $\Delta K'_{2U}$ (рис. 3, б – д). Это объясняется тем, что при нахождении составляющей K'_{2U} погрешность вносится непосредственно в определение падения напряжения на сопротивлении связи. В тоже время, при симметричной нагрузке характер изменения $\Delta K_{2уч сист}$ определяется исключительно погрешностью коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой – $\Delta K''_{2U}$ (рис. 3, а). В данном случае проявляются признаки нарушения симметрии по обратной последовательности только в системе [4].

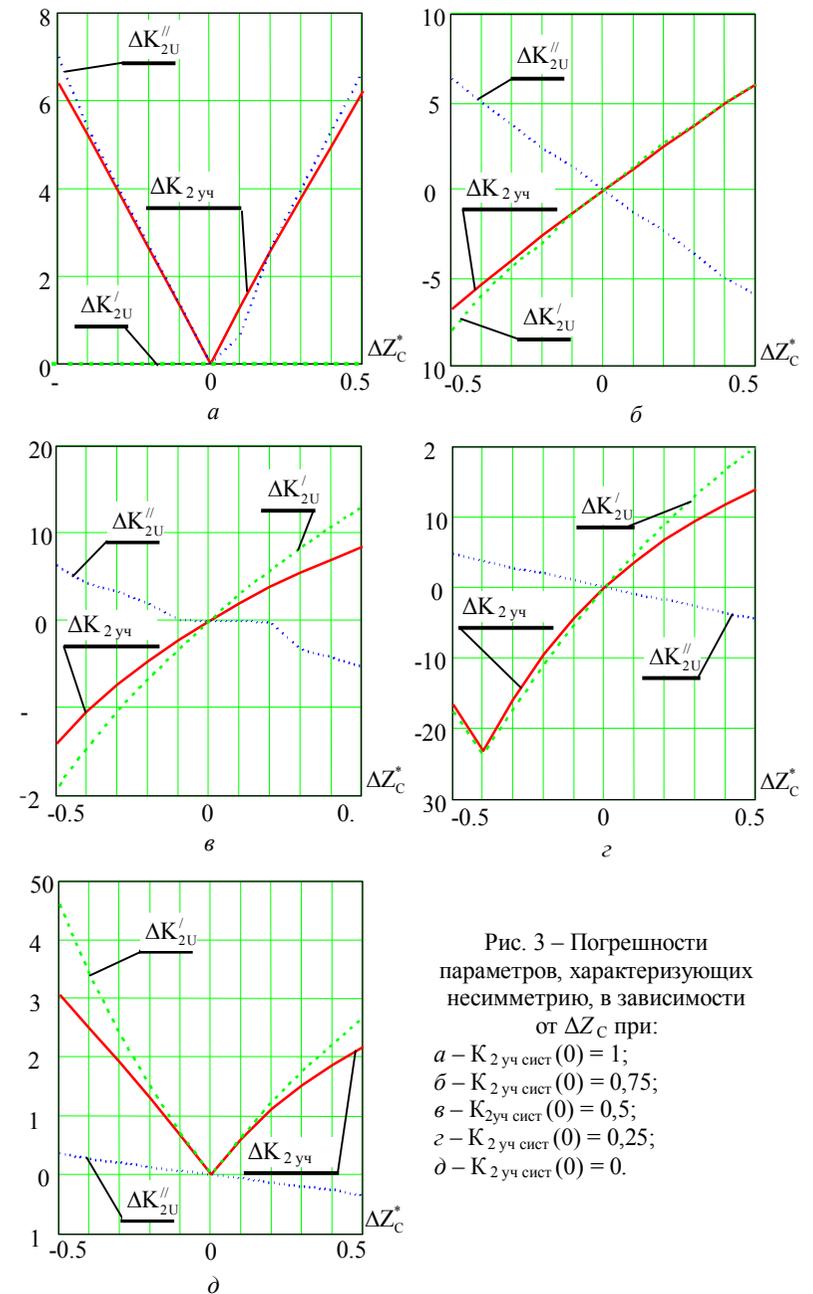


Рис. 3 – Погрешности параметров, характеризующих несимметрию, в зависимости от ΔZ_C^* при:
 а – $K_{2уч сист}(0) = 1$;
 б – $K_{2уч сист}(0) = 0,75$;
 в – $K_{2уч сист}(0) = 0,5$;
 г – $K_{2уч сист}(0) = 0,25$;
 д – $K_{2уч сист}(0) = 0$.

Выводы. Ошибка введения сопротивления связи с системой (ΔZ_C^*) может оказывать существенное влияние на погрешность определения участия поставщика и обобщенного потребителя сборных шин в нарушении симметрии напряжений ($\Delta K_{2\text{уч}}$). При этом приведенное значение $\Delta K_{2\text{уч}}$ приблизительно в два раза меньше, чем ΔZ_C^* . Для реальной ошибки введения информации, находящейся в пределах $\Delta Z_C^* \leq \pm 10\%$, следует ожидать погрешность определения участия субъектов $\Delta K_{2\text{уч}} \leq \pm 5\%$.

Список литературы: 1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ). 2. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии РД 153-34.0-15.501-01. Разработано научно-методическим центром 000 « Научный центр ЛИНВИТ». – Москва: 2001 – 23с. 3. Сендерович Г.А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений / Г.А. Сендерович // Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. Випуск 11 (186). – С. 330-335. 4. Сендерович Г.А. Анализ влияния потребителей не симметрию по обратной последовательности в точке общего присоединения / Г.А. Сендерович // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 1/2 (13). – С. 89 – 94. 5. Сендерович Г.А. Математическая модель для исследования несимметричных режимов в трехфазной сети / Г.А. Сендерович, В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. - 2005. – №57. – С. 86-93. 6. Щербакова П.Г. Развитие методов определения долевого вклада субъектов электрической системы в ухудшении качества электроэнергии: дис. на соискание степени канд. техн. наук: 05.14.02 / Щербакова Полина Геннадиевна. – Х., 2009. – 214 с.

Поступила в редколлегию 22.10.12

УДК 621.315

Влияние погрешности сопротивления связи с системой на определение долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений / Сендерович Г.А., Щербакова П.Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. –№.17 (990). – С.119-127. Бібліогр.: 6 назв. Іл.3.

У роботі проведені дослідження методичної похибки визначення часткової участі суб'єктів у порушенні симетрії напруг, яка викликана помилкою в оцінці опору зв'язку із системою.

Ключові слова: якість електричної енергії, порушення симетрії напруг, часткова участь суб'єктів, опору зв'язку із системою.

Studies of methodical error of determination of equity participation of subjects are at process undertaken in violation of symmetry of tensions, by the caused error in the estimation of resistance of connection with the system at the article.

Keywords: quality of electricity, symmetry breaking stress, partial part subjects supports communication with the system.

УДК 621.31

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ

Для трехфазной сети в точке подключения несимметричной нагрузки рассмотрены неуравновешенный и несбалансированный режимы потребления электроэнергии. Показано, что при синусоидальных процессах эти режимы определяют разные уравнения мощности. Получены формулы для вычисления мощности небаланса и неуровновешенности для синусоидальных процессов в трехпроводной цепи при несимметричном напряжении.

Ключевые слова: трехфазная цепь, мгновенная мощность, активная мощность, реактивная мощность, комплексная мощность, мощность небаланса, мощность пульсаций

В многофазной цепи с симметричными синусоидальными напряжениями и токами (в симметричном режиме) *мгновенная мощность* (ММ) не имеет переменной (пульсирующей) компоненты - режим *уравновешен* [1-3]. В реальной ситуации нарушение, как симметрии напряжений, так и симметрии токов приводит к пульсации ММ. Режим (синусоидальный или несинусоидальный) *неуравновешен*, если ММ имеет колебательную (пульсирующую) компоненту.

Мгновенная мощность (*активная* ММ) равна скорости передачи энергии. Однако скорость передачи энергии не полностью характеризует качество потока энергии и режим многофазной цепи. В трехфазной цепи *векторная* ММ (векторное произведение векторов мгновенных значений (м.з.) фазных напряжений и токов) дополняет характеристику энергетических процессов. Векторная ММ интерпретируется как *неактивная мгновенная мощность* [4]. Если *неактивная* ММ имеет колебательную составляющую - режим *несбалансирован*. *Активная* и *неактивная* ММ связаны уравнением мощности.

В многофазной цепи процессы *синусоидального* режима определены векторами комплексных *действующих величин* (д.в.) тока и напряжения, которые определяют *комплексные мощности* (КМ) сбалансированного и несбалансированного режимов. Стандартная КМ определяется как комплексное скалярное произведение (СП) векторов комплексных д.в. напряжений и токов. *Векторное произведение* (ВП) векторов комплексных д.в. напряжений и токов определяет комплексный вектор несбалансированной мощности [5]. ВП комплексно-сопряженного вектора напряжений и вектора токов определяет - комплексный вектор неппульсирующей мощности [6-8].

© Ю. А.Сиротин, 2013

Покажем, что при синусоидальных процессах при несимметричном напряжении введенные режимы описываются не единственным уравнением мощности для комплексных векторов мощности небаланса и неп пульсирующей мощности. Мощность небаланса и мощность пульсаций входят в различные уравнения мощностей, которые с разных сторон описывают энергетические процессы в трехфазной цепи.

Мгновенные мощности. Уравновешенный и сбалансированный режим.

В каждый момент времени состояние процессов в трехфазном сечении $\langle a, b, c \rangle$ характеризуется векторами мгновенных значений тока и напряжения

$$\mathbf{u}(t) = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))^* , \quad \mathbf{i} = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^* . \quad (1)$$

где $*$ – знак транспонирования.

Стандартная мгновенная мощность (ММ) определена как

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \frac{dW}{dt} \quad (2.a)$$

и характеризует скорость передачи энергии $W = W(t)$ в каждый момент времени. Стандартная ММ – скалярная величина (число) и в каждый момент времени она равна скалярному произведению векторов (1), которое вычисляется как произведение матрицы строки м.з. тока на матрицу столбец м.з. напряжений $p(t) = \mathbf{i}(t)^* \mathbf{u}(t)$.

Полагая, что процессы T -периодические, можно корректно определить среднее ММ и выделить переменную составляющую

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt , \quad p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t) . \quad (2.б)$$

Если ММ не имеет переменной (пульсирующей) компоненты $\tilde{p}(t) \equiv 0$, то режим *уравновешен* [1]. В общем случае $\tilde{p} = p(t) - \bar{p} \neq 0$ и режим *неуравновешен*. Симметричный режим *уравновешен*. Обратное утверждение не верно.

В несимметричном режиме стандартная ММ (скалярная величина) не единственная мгновенная характеристика наблюдаемого энергетического процесса. Уточняющую характеристику энергетических процессов дает векторная ММ (ВП векторов мгновенных фазных напряжений и токов) [4]:

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{i} \times \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_c i_b - u_b i_c \\ u_a i_c - u_c i_a \\ u_b i_a - u_a i_b \end{bmatrix} . \quad (3)$$

(Для сокращения записи зависимость от времени явно не указывается).

Подобно (2.б) можно выделить векторные составляющие: постоянную и переменную

$$\bar{\mathbf{q}} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} \mathbf{q}(t) dt ; \quad \tilde{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{q}(t) - \bar{\mathbf{q}} . \quad (4)$$

Режим, при котором векторная ММ не имеет переменной составляющей $\tilde{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0$ (тождественно равна нулю $\mathbf{q}(t) \equiv 0$) будем называть сбалансированным (реально сбалансированным) режимом.

Векторная ММ интерпретируется как неактивная ММ. Чтобы подчеркнуть это скалярную ММ называют активной ММ.

В каждый момент времени справедливо тождество векторной алгебры [9]

$$[\mathbf{i} \times \mathbf{u}]^* [\mathbf{i} \times \mathbf{u}] = \begin{bmatrix} (\mathbf{i}^* \mathbf{i}) & (\mathbf{i}^* \mathbf{u}) \\ (\mathbf{i}^* \mathbf{u}) & (\mathbf{u}^* \mathbf{u}) \end{bmatrix} . \quad (5)$$

Тождество (4) для мгновенных величин (1) дает мгновенное уравнение мощности

$$s^2(t) = p^2(t) + q^2(t) . \quad (6)$$

Здесь использованы стандартные обозначения для: скалярных квадратов векторов м.з. напряжений и токов

$$u^2(t) = |\mathbf{u}(t)|^2 = \mathbf{u}(t)^* \mathbf{u}(t) , \quad i^2(t) = |\mathbf{i}(t)|^2 = \mathbf{i}(t)^* \mathbf{i}(t) ; \quad (7)$$

квадратов мгновенных мощностей: активной, неактивной, и полной

$$p^2(t) = |(\mathbf{i}^* \mathbf{u})|^2 , \quad q^2(t) = \mathbf{q}(t)^* \mathbf{q}(t) , \quad s^2(t) = u^2(t) i^2(t) . \quad (8)$$

Если режим симметричен, то стандартная ММ не имеет переменной компоненты (режим *уравновешен*), а векторная ММ тождественно равна нулю.

3-проводная схема и неактивная ММ

В трехпроводной цепи напряжение можно измерять относительно искусственной точки заземления, что совместно с 1 законом Кирхгофа дает [3]

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) \equiv 0 , \quad u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) \equiv 0 \quad (9)$$

Здесь $\mathbf{e}_0 = (1, 1, 1)^* / \sqrt{3}$ – нормализованный вектор (орт $|\mathbf{e}_0| = 1$) 0–последовательности. Тем самым, в трехпроводной цепи энергетические процессы ортогональны орту \mathbf{e}_0 (не содержат 0–последовательность)

$$\mathbf{i}^* \mathbf{e}_0 \equiv 0 \Leftrightarrow \mathbf{i} \perp \mathbf{e}_0 ; \quad \mathbf{u}^* \mathbf{e}_0 \equiv 0 \Leftrightarrow \mathbf{u} \perp \mathbf{e}_0 . \quad (10)$$

Если вектора ортогональны e_0 , то их векторное произведение коллинеарно e_0 (в каждый момент времени) и совпадает со своей проекцией на орт e_0 .

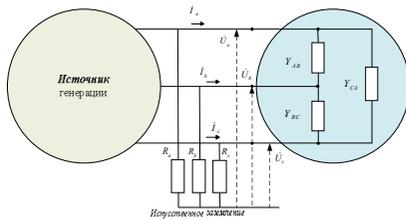


Рис. – Трехфазная трехпроводная цепь

Поэтому, для вектора неактивной ММ имеем

$$\mathbf{q} = \mathbf{i} \times \mathbf{u} = (\mathbf{i} \times \mathbf{u})_0 = \underbrace{[\mathbf{i} \mathbf{u} \mathbf{e}_0]}_{q_0} \mathbf{e}_0 = q_0 \mathbf{e}_0. \quad (11)$$

Вектор неактивной ММ полностью определен *скалярной* неактивной ММ $q_0 = q_0(t) = [\mathbf{i} \times \mathbf{u}] \cdot \mathbf{e}_0$ - алгебраической проекцией вектора $\mathbf{q} = \mathbf{i} \times \mathbf{u}$ на орт \mathbf{e}_0 . Алгебраическая проекция равна смешанному произведению векторов м.з. тока, м.з. напряжения и орта 0- последовательности

$$q_0 = \mathbf{e}_0 \cdot [\mathbf{i} \times \mathbf{u}] = \mathbf{i} \cdot [\mathbf{u} \times \mathbf{e}_0] = [\mathbf{i} \mathbf{u} \mathbf{e}_0] \quad (12)$$

Так как $q = |\mathbf{q}| = |q_0|$, то мгновенное уравнение мощности (8)

запишется как

$$s^2(t) = p^2(t) + q_0^2(t). \quad (13)$$

Синусоидальный режим и 3-комплексы

Мгновенные значения синусоидальных процессов напряжения и тока

$$\mathbf{u}(t) = \sqrt{2} \Re e [U e^{j\omega t}], \quad \mathbf{i}(t) = \sqrt{2} \Re e [I e^{j\omega t}] \quad (14)$$

однозначно определены трехмерными *комплексными* векторами (3-комплексами) напряжения $\mathbf{U} = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)'$ и тока $\mathbf{I} = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)'$ - векторами комплексных д.в.:

$$\mathbf{U} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (15)$$

где T – период ($T\omega = 2\pi$).

Комплексное скалярное произведение 3-комплексов (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) определено как произведение матрицы-строки $\mathbf{X}' = (\mathcal{X}_a, \mathcal{X}_b, \mathcal{X}_c)$ на комплексно сопряженную (КС) матрицу-столбец $\mathbf{Y}^* = (Y_a^*, Y_b^*, Y_c^*)'$.

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X}' \mathbf{Y}^* = \mathcal{X}_a Y_a^* + \mathcal{X}_b Y_b^* + \mathcal{X}_c Y_c^*, \quad (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = (\mathbf{Y}, \mathbf{X})^* \quad (16)$$

Скалярный квадрат 3-комплекса \mathbf{X} равен

$$X^2 = |\mathbf{X}|^2 = (\mathbf{X}, \mathbf{X}) = \mathbf{X}' \mathbf{X}^* = \mathcal{X}_a X_a^* + \mathcal{X}_b X_b^* + \mathcal{X}_c X_c^*. \quad (17)$$

3-комплексы \mathbf{X} и \mathbf{Y} ортогональны, если их комплексное скалярное произведение равно нулю

$$\mathbf{X} \perp \mathbf{Y} \Leftrightarrow (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X}' \mathbf{Y}^* = 0 \quad (18)$$

Активная мгновенная мощность синусоидального режима

Представляя (м.з.) синусоидальных процессов (14) как

$$\mathbf{u}(t) = [U e^{j\omega t} + U^* e^{-j\omega t}] / \sqrt{2}, \quad \mathbf{i}(t) = [I e^{j\omega t} + I^* e^{-j\omega t}] / \sqrt{2}, \quad (19)$$

для стандартной ММ будем иметь

$$p(t) = \mathbf{u}(t) \cdot \mathbf{i}(t) = \Re e [U^* I^* + I^* U e^{j2\omega t}]. \quad (20)$$

Комплексная величина $U^* I^* = P + jQ$ равна стандартной

комплексной мощности (КМ)

$$\mathcal{S} = U_a^* I_a^* + U_b^* I_b^* + U_c^* I_c^* = U^* I^* \quad (21)$$

Реальная часть стандартной КМ равна средней мощности за интервал наблюдения $[\tau, \tau + T]$

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt, \quad \bar{p} = \Re e \mathcal{S} = P. \quad (22)$$

Мнимая часть КМ $\Im m \mathcal{S} = Q$ определяет реактивную мощность синусоидального режима.

Комплексная величина

$$I^* U = U_a^* \mathcal{X}_a + U_b^* \mathcal{X}_b + U_c^* \mathcal{X}_c = \mathcal{N} = N e^{j \arg \mathcal{N}} \quad (23.a)$$

определяет комплексную амплитуду пульсаций ММ (комплексную мощность пульсаций) переменной составляющей активной ММ

$$\tilde{p} = \Re e [\dot{N} e^{j2\omega t}] = N \cos(2\omega t + \arg \dot{N}). \quad (23.b)$$

Отметим, что стандартная КМ равна комплексному СП 3-комплексов напряжения \mathbf{U} и тока \mathbf{I} [3]. Комплексная мощность пульсаций (МП)

равна комплексному СП 3-комплекса тока и (КС) 3-комплекса напряжения $U^* = [U_a^* U_b^* U_c^*]^T$ [5]

$$\mathcal{S} = U \cdot I^* = (U, I), \quad \mathcal{N} = I \cdot (U^*)^* = (I, U^*). \quad (24)$$

Тем самым для ММ справедливо

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u(t) \cdot i(t) = P + N \cos(2\omega t + \arg \mathcal{N}), \quad (25)$$

и синусоидальный режим *уравновешен* $\tilde{p} = \Re e[\dot{N} e^{j2\omega t}] \equiv 0$, если выполняется одно из эквивалентных утверждений

$$N = 0 \Leftrightarrow U^* \perp I. \quad (26)$$

Так, при симметричном напряжении прямой последовательности, режим уравновешен, если ток не содержит обратную последовательность. (Наличие тока 0-последовательности не приводит к пульсациям ММ.)

Векторная мгновенная мощность синусоидального режима.

ВП 3-комплексов X и Y определяется также как ВП для вещественных 3-векторов.

$$X \times Y = \begin{bmatrix} \dot{X}_b \dot{Y}_c - \dot{X}_c \dot{Y}_b \\ \dot{X}_c \dot{Y}_a - \dot{X}_a \dot{Y}_c \\ \dot{X}_a \dot{Y}_b - \dot{X}_b \dot{Y}_a \end{bmatrix}. \quad (27)$$

3-комплексы X and Y параллельны (коллинеарны $X \parallel Y$), если их координаты комплексно пропорциональны или ВП равно нулю

$$X \parallel Y \Leftrightarrow X = \lambda Y (\lambda \neq 0) \Leftrightarrow X \times Y = 0. \quad (28)$$

Используя представление (19) для м.з. напряжений и токов можно показать, что в синусоидальном режиме векторная ММ (3) равна

$$q = i \times u = \Re e[I \times U^* + (I \times U) e^{j2\omega t}], \quad (29)$$

и представляется двумя векторными комплексными мощностями: ВП 3-комплексов напряжения и тока и ВП 3-комплекса напряжения и КС 3-комплекса тока

$$D = I \times U, \quad K = I \times U^*. \quad (30)$$

Тем самым, векторная ММ может быть записана как

$$q = \underbrace{\Re e[K]}_{\bar{q}} + \underbrace{\Re e[D e^{j2\omega t}]}_{\dot{q}}. \quad (31)$$

Выражение (31) дает явное представление для постоянной и переменной составляющих в синусоидальном режиме

$$\bar{q} = \Re e[K], \quad \dot{q}(t) = \Re e[D e^{j2\omega t}]. \quad (32)$$

Из (28- 32) следует, что синусоидальный режим *сбалансирован*

$$\tilde{q}(t) = \Re e[D e^{j2\omega t}] \equiv 0, \quad (33)$$

если выполняется одно из эквивалентных утверждений

$$D = 0 \Leftrightarrow U \parallel I \Leftrightarrow I = \lambda U. \quad (34)$$

3-комплекс $D = I \times U$ в [6] был назван 3-комплексом (вектором) мощности *небаланса*. 3-комплекс $K = I \times U^*$ можно назвать вектором *непульсирующей* мощности.

Уравнения мощности несбалансированного и неуровновешенного синусоидального режимов

Операции сложения и умножения для вещественных и комплексных чисел обладают одинаковыми свойствами. Поэтому тождество векторной алгебры (4) остается справедливым и для комплексных векторов. Следует только вместо вещественного скалярного произведения использовать комплексное СП. Можно показать, что для 3-комплексов справедливо тождество подобное (5)

$$[X \times Y]^* \cdot [X^* \times Y^*] = \begin{vmatrix} (X \cdot X^*) & (X \cdot Y^*) \\ (Y \cdot X^*) & (Y \cdot Y^*) \end{vmatrix}. \quad (35.a)$$

Откуда имеем

$$|X \times Y|^2 = |X|^2 |Y|^2 - |X \cdot Y^*|^2. \quad (35.b)$$

Здесь и дальше использованы стандартные обозначения для скалярных квадратов комплексного СП (16)

$$X^2 = |X|^2 = X \cdot X^*, \quad Y^2 = |Y|^2 = Y \cdot Y^*, \quad (36)$$

и очевидные свойства операции комплексного сопряжения

$$Y \cdot X^* = (X \cdot Y^*)^*, \quad |X \times Y|^2 = (X \times Y)^* \cdot (X \times Y)^*. \quad (37)$$

Полагая $X = I$, $Y = U$ и используя $\dot{S} = U \cdot I^*$ и $S^* = I \cdot U^*$ из (37) получим

$$|I|^2 |U|^2 = \dot{S} S^* + D \cdot D^*. \quad (38)$$

Тождество (38) дает квадратичное разложение [5,6] полной (кажущейся) мощности по Бухгольцу $S_B = |I \times U| = U \cdot I$ на две компоненты

$$S_B^2 = S_G^2 + D_u^2. \quad (39)$$

Здесь и дальше:

- $S_G = |U \cdot I^*| = \sqrt{\dot{S} S^*} = |\dot{S}|$ – геометрическая мощность, равная модулю стандартной КМ;
- $D_u = |D| = \sqrt{D \cdot D^*}$ – норма 3- комплекса небаланса.

Так как $S_G^2 = P^2 + Q^2$, из (27) имеем уравнение мощности для оценки дополнительных потерь в несбалансированном режиме

$$S_B^2 = P^2 + \underbrace{Q^2 + D_u^2}_{\text{дополнительные потери}}. \quad (40)$$

В синусоидальном режиме дополнительные потери обусловлены не только реактивной мощностью, но и небалансом режима, который определен 3-комплексом $\mathbf{D} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}$. Коэффициент мощности при этом равен

$$\lambda = \frac{P}{S_B} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_u^2}}. \quad (41)$$

Если в (34) проводимость $\mathbf{Y} = G + jB$ вещественное число ($B = 0$), то режим *реально сбалансирован* [6]. В этом случае полная мощность равна активной мощности, а коэффициент мощности равен 1.

Из (35), полагая $\mathbf{X} = \mathbf{I}$, $\mathbf{Y} = \mathbf{U}^*$ и используя $\mathbf{N} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}^* = (\mathbf{I}, \mathbf{U}^*)$, имеем другое *квадратичное разложение полной мощности для оценки неуровновешенности режима* [6]

$$|\mathbf{I}|^2 |\mathbf{U}|^2 = \dot{N} N^* + \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^*, S_B^2 = N^2 + K^2. \quad (42)$$

Положительная скалярная величина $K^2 = \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^*$ характеризует неп пульсирующие процессы синусоидального режима и дополняет положительную величину $N^2 = \dot{N} N^*$ в уравнении мощности (42) неуровновешенного режима. Степень неуровновешенности режима можно определить коэффициентом пульсаций

$$\lambda_N = \frac{N}{S_B} = \frac{N}{\sqrt{N^2 + K^2}}. \quad (43)$$

Если режим *реально сбалансирован* ($\mathbf{I} = G\mathbf{U}$, $G > 0$), то

$$\mathbf{K} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}^* = G\mathbf{U} \times \mathbf{U}^* \Rightarrow \mathbf{K}^* = -\mathbf{K},$$

и вектор неп пульсирующей мощности (30) имеет чисто мнимые координаты, что дает

$$\mathbf{K} = jG\Im m[\mathbf{U} \times \mathbf{U}^*] \quad \bar{q} = \Re e[\mathbf{K}] = 0 \quad (44.a)$$

Таким образом, векторная ММ *реально сбалансированного* синусоидального режима равна нулю $\mathbf{q}(t) \equiv 0$. Справедливо и обратное утверждение. Если векторная ММ равна нулю, то режим *реально сбалансирован* и коэффициент мощности равен 1.

$$\mathbf{q} \equiv 0 \Leftrightarrow \mathbf{I} = G\mathbf{U}, \quad G > 0. \quad (44.b)$$

Однако мощность пульсаций при этом $\mathbf{N} = \mathbf{I} \times \mathbf{U} = G\mathbf{U} \times \mathbf{U} \neq 0$ отлична от нуля (если напряжение несимметрично [6]). Тем самым, уравновешенный и сбалансированный режим – различные энергетические понятия. Сбалансированный режим может быть неуровновешенным и наоборот. Однако введенные мощности разложения (42) связаны с мощностями разложения (39) [6].

3-проводная схема с синусоидальными процессами

Проведем анализ рассматриваемых синусоидальных режимов для трехпроводной цепи. Из (10) следует, что в синусоидальном режиме для 3-комплексов напряжения $\mathbf{U} = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)'$ и тока $\mathbf{I} = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)'$ выполнено

$$\mathbf{U}' \mathbf{e}_0 = 0, \quad \mathbf{I}' \mathbf{e}_0 = 0. \quad (45)$$

Можно показать, что если 3-комплексы ортогональны орту \mathbf{e}_0 , то их ВП коллинеарно \mathbf{e}_0 и совпадает со своей проекцией на орт \mathbf{e}_0 :

$$\mathbf{X} \perp \mathbf{e}_0 \text{ и } \mathbf{Y} \perp \mathbf{e}_0 \Rightarrow \mathbf{X} \times \mathbf{Y} = ([\mathbf{X} \times \mathbf{Y}]' \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0. \quad (46)$$

Утверждение (46) для 3-комплексов мощностей (30) дает

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_0 = \dot{D}_0 \mathbf{e}_0, \quad \mathbf{K} = \mathbf{K}_0 = \dot{K}_0 \mathbf{e}_0. \quad (47)$$

Алгебраические проекции 3-комплексов мощностей на орт \mathbf{e}_0

$$\dot{D}_0 = (\mathbf{I} \times \mathbf{U})' \mathbf{e}_0, \quad \dot{K}_0 = (\mathbf{I} \times \mathbf{U}^*)' \mathbf{e}_0 \quad (48)$$

- комплексные величины, (равные смешанным произведениям) названы фазором *мощности небаланса* и фазором *непульсирующей мощности*, соответственно [6].

Дуальные уравнения мощности (42) и (40) записываются как

$$S_B^2 = P^2 + Q^2 + D_0^2, \quad S_B^2 = K_0^2 + N^2. \quad (49)$$

Для векторной ММ (11) справедливо

$$\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}' \mathbf{e}_0 = \Re e[\dot{K}_0 + \dot{D}_0 e^{j2\omega t}], \quad \bar{q}_0 = \Re e[\dot{K}_0], \quad \tilde{q}_0 = \Re e[\dot{D}_0 e^{j2\omega t}]. \quad (50)$$

Синусоидальный режим и симметричные координаты

Дальнейший анализ проведем, используя модифицированный метод симметричных координат [6], который использует ортонормированный базис прямой и обратной последовательностей

$$\mathbf{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^* \\ \alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^* \end{bmatrix}. \quad (51)$$

Здесь $\alpha = e^{j2\pi/3}$ ($\alpha^2 = \alpha^*$, $\alpha\alpha^* = 1$). Орты 1- и 2- последовательностей связаны операцией комплексного сопряжения $\mathbf{e}_2 = (\mathbf{e}_1)^*$.

Для ортов (51) справедливы равенства

$$\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{e}_m^* = \begin{cases} 0, & k \neq m \\ 1, & k = m \end{cases} \quad \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{e}_m = \begin{cases} 1, & k \neq m \\ 0, & k = m \end{cases} \quad k, m = 1, 2. \quad (52)$$

3-комплексы тока и напряжения в базисе (51) имеют разложения

$$\mathbf{I} = \dot{I}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{I}_2 \mathbf{e}_2 = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2, \quad \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = \dot{U}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{U}_2 \mathbf{e}_2. \quad (53)$$

Коэффициенты разложения (53) определяют симметричные координаты, которые вычисляются как [6]

$$\dot{I}_1 = (\mathbf{I}, \mathbf{e}_1) = \mathbf{I} \cdot \mathbf{e}_1^* = \mathbf{I} \cdot \mathbf{e}_2, \quad \dot{I}_2 = (\mathbf{I}, \mathbf{e}_2) = \mathbf{I} \cdot \mathbf{e}_2^* = \mathbf{I} \cdot \mathbf{e}_1; \quad (54.a)$$

$$\dot{U}_1 = (\mathbf{U}, \mathbf{e}_1) = \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_1^* = \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_2, \quad \dot{U}_2 = (\mathbf{U}, \mathbf{e}_2) = \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_2^* = \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_1. \quad (54.б)$$

Для комплексно-сопряженного 3-комплекса тока имеем

$$\mathbf{I}^* = (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2)^* = \mathbf{I}_1^* + \mathbf{I}_2^* = (\dot{I}_1)^* (\mathbf{e}_1)^* + (\dot{I}_2)^* (\mathbf{e}_2)^* = (\dot{I}_2)^* \mathbf{e}_1 + (\dot{I}_1)^* \mathbf{e}_2 \quad (55)$$

В базисе симметричных координат получим

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^* = (\mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2) \cdot (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2)^* = (\mathbf{U}_1) \cdot (\mathbf{I}_1)^* + (\mathbf{U}_2) \cdot (\mathbf{I}_2)^* \quad (56)$$

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2) \cdot (\mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2) = \mathbf{I}_1 \cdot \mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{U}_1 \quad (57)$$

Тождества (56-57) дают выражения для стандартной комплексной мощности и комплексной мощности пульсаций

$$\dot{S} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^* = \dot{U}_1 \dot{I}_1^* + \dot{U}_2 \dot{I}_2^*, \quad \dot{N} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = \dot{I}_1 \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{U}_1. \quad (58)$$

Прямыми вычислениями можно проверить, что для векторных произведений ортов (49) справедливы равенства

$$\mathbf{e}_k \times \mathbf{e}_m = \begin{cases} (m-k) \mathbf{j} \mathbf{e}_0, & k \neq m \\ 0, & k = m \end{cases} \quad k, m = 1, 2 \quad (59)$$

Кроме того можно проверить, что

$$\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_0 = -\mathbf{j} \mathbf{e}_1, \quad \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_0 = \mathbf{j} \mathbf{e}_2 \quad (60)$$

3-комплекс мощности небаланса в симметричных координатах

$$\begin{aligned} \mathbf{D} = \mathbf{I} \times \mathbf{U} &= (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2) \times (\mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2) = \mathbf{I}_1 \times \mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \times \mathbf{U}_1 \\ &= (\dot{U}_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_2) [\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2] = \underbrace{j(\dot{U}_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_2)}_{\dot{D}_0} \mathbf{e}_0 = \dot{D}_0 \mathbf{e}_0 \end{aligned}$$

имеет только 0-последовательность. Фазор (1-комплекс) мощности

небаланса равен

$$\dot{D}_0 = j(\dot{U}_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_2). \quad (61)$$

Цепочка преобразований 3-комплекса непульсирующей мощности $\mathbf{K} = \mathbf{U} \times \mathbf{I}^*$ в симметричных координатах с учетом (59-60) дает

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}^* &= (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2) \times (\mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2)^* = [\dot{I}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{I}_2 \mathbf{e}_2] \times [(\dot{U}_1)^* \mathbf{e}_2 + (\dot{U}_2)^* \mathbf{e}_1] \\ &= (\dot{I}_1 \mathbf{U}_1^* - \dot{I}_2 \mathbf{U}_2^*) \underbrace{[\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2]}_{\mathbf{j} \mathbf{e}_0} = \underbrace{j(\mathbf{S}_1^* - \mathbf{S}_2^*)}_{\dot{K}_0} \mathbf{e}_0 = \dot{K}_0 \mathbf{e}_0 \end{aligned}$$

Здесь $\dot{S}_1 = \dot{U}_1 \mathbf{I}_1^*$, $\dot{S}_2 = \dot{U}_2 \mathbf{I}_2^*$ комплексные мощности 1-, 2-последовательностей. Фазор (1-комплекс) непульсирующей мощности равен

$$\dot{K}_0 = j(\dot{I}_1 \mathbf{U}_1^* - \dot{I}_2 \mathbf{U}_2^*) = (\mathcal{Q}_1 - \mathcal{Q}_2) + j(\mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_2). \quad (62)$$

Симметричное напряжение

Если напряжение симметрично $\mathbf{U} = \dot{U}_1 \mathbf{e}_1$ ($\dot{U}_2 = 0$), то для рассматриваемых выше комплексных мощностей имеем:

$$\dot{K}_0 = j(\dot{I}_1 \mathbf{U}_1^*) = \mathcal{Q}_1 + j\mathcal{P}_1, \quad \dot{D}_0 = -j\dot{U}_1 \dot{I}_2; \quad (63.a)$$

$$\dot{N} = \dot{U}_1 \dot{I}_2, \quad \dot{S} = \dot{U}_1 \mathbf{I}_1^* = \dot{S}_1. \quad (63.б)$$

Справедливы равенства между введенными комплексными мощностями

$$\dot{D}_0 = -j\dot{U}_1 \dot{I}_2 = -j\dot{N}; \quad \dot{K}_0 = j\mathbf{U}_1 \mathbf{I}_1^* = j\mathbf{S}_1^* = \mathcal{Q}_1 + j\mathcal{P}_1. \quad (64)$$

В этом режиме имеем

$$\mathcal{q}_0 = \mathbf{q} \cdot \mathbf{e}_0 = \Re e[\dot{K}_0 + \dot{D}_0 e^{j2\omega t}] = \mathcal{Q}_1 + \Re e[\dot{D}_0 e^{j2\omega t}]. \quad (65)$$

Таким образом, в трехпроводной цепи при симметричном напряжении:

- комплексная мощность пульсаций \dot{N} отличается от комплексной мощности небаланса \dot{D}_0 лишь фазовым множителем ($\dot{D}_0 = -j\dot{N}$).

Если режим уравновешен, то он и сбалансирован и наоборот.

- комплекс непульсирующей мощности \dot{K}_0 отличается от стандартной КС комплексной мощности \mathbf{S}^* лишь фазовым множителем ($\dot{K}_0 = j\mathbf{S}^*$).

Для активной и неактивной ММ справедливы формулы

$$p(t) = \mathcal{P}_1 + \Re e[\dot{D}_0 e^{j(2\omega t - \pi/2)}], \quad q_0(t) = \mathcal{Q}_1 + \Re e[\dot{D}_0 e^{j2\omega t}]. \quad (66)$$

В 3-проводной цепи при симметричном напряжении сбалансированность и уравновешенность режимов – эквивалентные понятия. Амплитуды пульсаций активной ММ и скалярной неактивной ММ совпадают ($N = D_0$).

Режим реально сбалансирован, если он сбалансирован и реактивная мощность равна нулю. Если напряжение *симметрично*, то симметричные координаты тока

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{U}_1, \quad \dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{U}_1. \quad (67)$$

вычисляются с помощью проводимостей прямой и обратной последовательности по межфазным проводимостям

$$\dot{Y}_1 = G_1 + jB_1 = \dot{Y}_{AB} + \dot{Y}_{BC} + \dot{Y}_{CA}, \quad (68.a)$$

$$\dot{Y}_2 = G_2 + jB_2 = -(\alpha \dot{Y}_{AB} + \alpha^* \dot{Y}_{BC} + \dot{Y}_{CA}). \quad (68.a)$$

Коэффициент мощности и коэффициент пульсации при симметричном напряжении вычисляются через эти проводимости

$$\lambda^2 = \frac{P^2}{S_B^2} = \frac{(\Re \dot{Y}_1)^2}{Y_1^2 + Y_2^2}, \quad \lambda_N^2 = \frac{N^2}{S_B^2} = \frac{Y_2^2}{Y_1^2 + Y_2^2}. \quad (69)$$

Примеры неуровновешенного и несбалансированного режимов при симметричном напряжении

В 3-проводной схеме (Рис.) с несимметричной линейной нагрузкой типа треугольник и симметричным напряжением источника генерации 3-комплекс прямой последовательности определен базовой величиной напряжения на одну фазу $\tilde{U} = |U|/\sqrt{3}$ ($\dot{U}_1 = \sqrt{3}\tilde{U}$). Базовые величины на одну фазу: проводимость \tilde{Y} , напряжение \tilde{U} , ток \tilde{I} , мощность \tilde{W} удовлетворяют соотношениям $\tilde{W} = \tilde{U}\tilde{I} = \tilde{Y}\tilde{U}^2$ и $\tilde{I} = \tilde{Y}\tilde{U}$.

Нагрузка задана проводимостями фаз (Табл.1).

Таблица 1–Проводимости нагрузки

	1	2	3	4
\dot{Y}_{AB}	\tilde{Y}	\tilde{Y}	$e^{j\pi/6}\tilde{Y}$	$e^{-j\pi/6}\tilde{Y}$
\dot{Y}_{BC}	0	$j\tilde{Y}/\sqrt{3}$	$e^{j\pi/2}\tilde{Y}$	$e^{j\pi/6}\tilde{Y}$
\dot{Y}_{CA}	0	$-j\tilde{Y}/\sqrt{3}$	0	0
λ	$1/\sqrt{2}$	1	0.5	1

Результаты расчета сведены в Табл.2.

Пример 1. Одноплечевая нагрузка с активной проводимостью $G_{AB} = \tilde{Y}$. Режим несбалансирован и неуровновешен. $p(t) = 3\tilde{W}[1 + \cos(2\omega t - \pi/3)]$.

Пример 2. Симметризатор-компенсатор Штейнметца.

Схема Штейнметца симметризует одноплечевую нагрузку *примера 1* путем добавления в два остальных плеча индуктивности и емкости, так что D – нагрузка определена межфазными проводимостями: $\dot{Y}_{AB} = \tilde{Y}$, $\dot{Y}_{BC} = j\tilde{Y}/\sqrt{3}$, $\dot{Y}_{CA} = -j\tilde{Y}/\sqrt{3}$. Проводимость тока прямой последовательности чисто активная и совпадает с активной проводимостью плеча AB $\dot{Y}_1 = \tilde{Y} = G_{AB}$. Проводимость тока 2-последовательности равна нулю. Нагрузка схемы Штейнметца активно сбалансирована.

Пример 3. Комплексно сбалансированная нагрузка. Межфазные проводимости равны $\dot{Y}_{AB} = e^{j30^\circ}$, $\dot{Y}_{BC} = j = e^{j90^\circ}$, $\dot{Y}_{AC} = 0$. Проводимость тока 1-последовательности комплексная и равна: $\dot{Y}_1 = \sqrt{3}e^{j60^\circ}$, $G_1 = \sqrt{3}/2$, $B_1 = 3/2$. Проводимость 2-последовательности равна нулю, тем самым отсутствует ток 2-последовательности. Полный ток совпадает с током 1-последовательности. Нагрузка комплексно-сбалансирована $I = I_1 = \dot{Y}_1 U$, однако реально не сбалансирована ($B_1 = 3/2 \neq 0$). Полная мощность равна геометрической мощности $S_B = S_G$. Между полным (1-последовательности) током и напряжением имеется фазовый сдвиг $\varphi = \arccos(P/S_G) = 60^\circ$, который оценивается коэффициентом мощности $\lambda = P/S_G = G_1/Y_1 = 0.5$. ММ пульсирует $p(t) = 3\tilde{W}[2 + \cos(2\omega t)]$. Коэффициент пульсации равен $1/\sqrt{5}$.

Пример 4. 2-плечевая реально сбалансированная нагрузка. Схема уравнивает режим чисто активной несимметричной 2-плечевой нагрузки $\dot{Y}_{AB} = \sqrt{3}\tilde{Y}/2$, $\dot{Y}_{BC} = \sqrt{3}\tilde{Y}/2$, $\dot{Y}_{AC} = 0$ включением в те же плечи реактивной нагрузки: $\dot{Y}_{AB} = -j\tilde{Y}/2$, $\dot{Y}_{BC} = j\tilde{Y}/2$, $\dot{Y}_{AC} = 0$. Также как и в схеме Штейнметца отсутствует ток 2-последовательности и реактивная составляющая тока 1-последовательности.

Полный ток совпадает с активной составляющей тока 1-последовательности. Не смотря на то, что суммарная нагрузка несимметрична и имеет реактивные элементы, она со стороны источника видна как чисто активная и симметричная (режим сбалансирован и уравновешен). Полная мощность равна активной мощности.

Таблица 2–Результаты расчетов

№	1	2	3	4
\dot{Y}_1	\dot{Y}	\dot{Y}	$2\dot{Y}$	\dot{Y}
\dot{Y}_2	$e^{-j\pi/3}\dot{Y}$	0	$-\dot{Y}$	0
$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 U $	$\sqrt{3}\dot{I}$	$\sqrt{3}\dot{I}$	$2\sqrt{3}\dot{I}$	$\sqrt{3}\dot{I}$
$\dot{I}_2 = \dot{Y}_2 U $	$\sqrt{3}e^{-j\pi/3}\dot{I}$	0	$-\sqrt{3}\dot{I}$	0
$ I = \sqrt{ \dot{I}_1 ^2 + \dot{I}_2 ^2}$	$\sqrt{6}\dot{I}$	$\sqrt{3}\dot{I}$	$\sqrt{15}\dot{I}$	$(3/\sqrt{2})\dot{I}$
$P = \Re(\dot{I}_1) U $	$3\tilde{W}$	$3\tilde{W}$	$6\tilde{W}$	$3\tilde{W}$
$\dot{D}_0 = \dot{I}_2 U $	$e^{-j\pi/3}3\tilde{W}$	0	$-j3\tilde{W}$	0
$S_B = I U $	$3\sqrt{2}\tilde{W}$	$3\tilde{W}$	$3\sqrt{5}\tilde{W}$	$3\tilde{W}$
$\dot{N} = \dot{I}_2 U $	$e^{-j\pi/3}3\tilde{W}$	0	$3\tilde{W}$	0
$\dot{K}_0 = -j\dot{I}_1 U $	$-j3\tilde{W}$	0	$-j6\tilde{W}$	0
$\lambda = P/S_B$	$1/\sqrt{2}$	1	$2/\sqrt{5}$	1
$\lambda_N = N/S_B$	$1/\sqrt{2}$	0	$1/\sqrt{5}$	0

Выводы. Для классификации режимов потребления электроэнергии дополнительно к активной мгновенной мощности использована неактивная (векторная) ММ. Эти ММ удовлетворяют уравнению мгновенных мощностей. Показано, что в трехпроводной цепи векторная ММ полностью определена своей 0-составляющей. При синусоидальных процессах введенные режимы описываются двумя различными уравнениями мощности для комплексных векторов: мощности небаланса и непульсирующей мощности. В синусоидальном режиме для трехпроводной цепи получены формулы для расчета мощности небаланса и непульсирующей мощности. Показано, что при симметричном напряжении мощность пульсаций совпадает с мощностью небаланса. Режим в такой цепи может быть описан одним уравнением мощности.

Список литературы: 1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин. – М. - Л. : «Госэнергоиздат», 1955.–216 с. 2. Кузнецов В.Г. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А.Н.Милах, А.К.Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1973. –218с. 3. Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К Шидловский., В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 266 с. 4. F. Z. Peng Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems / F. Z. Peng, J. S. Lai // IEEE Trans. Instrum. Meas. –1996.– vol. 45, no.1. – pp. 293-297. 5. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющие тока в трехфазной несимметричной системе /Ю. А. Сиротин //Вісник ПДТУ.– 2008. – Вип. №18. – С. 81-87. 6. Сиротин Ю. А.

Ток, мощность и уравнение пульсаций в трехфазной системе / Ю. А. Сиротин // Вісник НТУ «ХП». –2012. – №. 23. –С. 146-159 7. Sirotin. Iu. A. Fryze's compensator and Fortescue transformation / Iu. A. Sirotin // “Przeгляд Elektrotechniczny” (Electrical Review). –2011.–vol. 1. – pp.101-106. 8. Сиротин Ю. А. Δ -симметризатор - компенсатор Фризе / Ю. А. Сиротин // Вісник НТУ «ХП». – 2010. – №. 45. – С. 145-157. 9. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г.Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. –832 с.

Поступила в редколлегию 12.12.12

УДК 621.31

Энергетические режимы трехфазной трехпроводной цепи / Сиротин Ю.А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. –Харків: НТУ «ХП». – 2013. –№.17 (990). –С.128-141. Бібліогр.:9 назв. Табл.: 2. Іл.: 1.

Для трьохфазної мережі в точці підключення несиметричного навантаження розглянуті неврвноважений і незбалансований режими споживання електроенергії. Показано, що при синусоїдальних процесах ці режими визначають різні рівняння потужності. Отримано формули для обчислення потужності небалансу і неврвноваженості для синусоїдальних процесів в трипровідному ланцюгу при несиметричній напрузі.

Ключові слова: трифазний ланцюг, миттєва потужність, активна потужність, реактивна потужність, комплексна потужність, потужність небалансу, потужність пульсацій

Pulsed and unbalanced modes of power consumption are considered in connection point of asymmetrical load to three-phase network. It is shown that these modes define different power equations with sinusoidal processes. The formulas for calculating the pulsed power and unbalanced power are obtained for sinusoidal processes with asymmetric voltage in a three-wire circuit.

Keywords: three-phase circuit, instantaneous power, active power, reactive power, complex power, power unbalance

Ю. Е. МЕГЕЛЬ, д-р. техн. наук, проф., ХНТУСХ, Харьков;
А. П. РУДЕНКО, канд. техн. наук, доц., ХНТУСХ, Харьков;
А. И. РЫБАЛКА, канд. физ.-мат. наук, доц., ХНУРЕ, Харьков;
И. В. ДАНИЛКО, канд. техн. наук, ст. препод., ХНТУСХ, Харьков

МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

В статье рассматривается задача оптимального распределения потоков мощности в сетях электроснабжения. Цель - принятие решения о рациональном использовании возможностей существующих электросетей. Обосновано оценку максимально-допустимой общей передаваемой мощности при обеспечении заданных ограничений по мощности и напряжениям на распределительных пунктах и у потребителей.

Ключевые слова: сеть электроснабжения, оптимизация, распределение мощностей, минимизация потерь, пропускная способность, моделирование.

Вступление. Надежность и качество электроснабжения в значительной мере определяется условиями работы электрических сетей. Существенное значение имеет оптимизация распределения потоков мощности в распределительных устройствах и линиях электропередач по тем или иным критериям [1]. Одним из критериев является пропускная способность сети при заданных ограничениях на качество электроснабжения потребителей электроэнергии. Такая задача неизбежно возникает при принятии решения о реконструкции существующих сетей и изменении ее структуры, режимов работы, нагрузок потребителей, параметров линий передач, оборудования и т.п. [2]. Изменение параметров даже одного звена сети может вызвать существенное изменение показателей работы других линий и потребителей [3]. Оценка общей пропускной способности сети позволяет также правильно определить необходимую мощность питающего трансформатора сети. Поэтому представляется актуальным моделирование всей сети в целом для поиска оптимального распределения потоков мощности во всех звеньях сети с целью обеспечения ее максимальной пропускной способности и заданных ограничений на качество электроснабжения потребителей.

Постановка задачи. Для моделирования поиска оптимального распределения потоков мощностей в стационарном режиме работы сети воспользуемся элементами теории электрических цепей и математического программирования [1,4].

Во избежание излишних усложнений модели для некоторых ее параметров будем принимать приближенные значения, достаточные для практических расчетов. Построение общей модели приемлемой при практическом использовании с любой топологией существующих сетей представляется достаточно сложным. Наиболее распространенными являются радиальная и магистральная и их модификации.

Рассмотрим пример радиальной схемы симметричной трехфазной сети (см. рис. 1), состоящей из m распределительных устройств P_j , $j = \overline{1, m}$, подключенной к источнику электроэнергии P_0 с линейным напряжением U_0 .

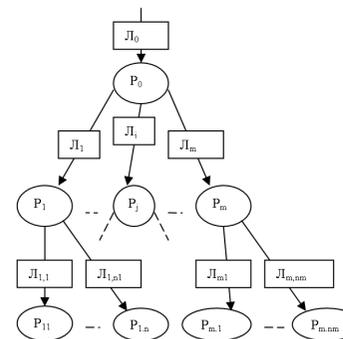


Рис. 1 – Схема радиальной симметричной трехфазной сети

Необходимо найти такие допустимые значения передаваемой мощности P_j и P_{jk} по каждой линии электропередач L_j , $j = \overline{1, m}$; L_{jk} , $k = \overline{1, n_j}$ с заданными комплексами полных сопротивлений $z_j = r_j + i \cdot x_j$, $z_{jk} = r_{jk} + i \cdot x_{jk}$, при которых суммарная передаваемая мощность от источника электроэнергии P_0 до всех потребителей будет максимальной и выполняются заданные ограничения на допустимые потери напряжений Δu_i , Δu_{ik} для всех распределительных устройств P_j и потребителей P_{jk} . Составим модель задачи, полагая линейными параметры линий электропередач $z_j = r_j + i \cdot x_j$ и учитывая, что полная мощность S_{jk} каждого потребителя может быть выражена комплексной суммой активной P_{jk} и мнимой $i \cdot P_{jk} \cdot \text{tg}(\varphi_{jk})$ составляющих:

$$S_{jk} = P_{jk} + i \cdot P_{jk} \cdot \text{tg}(\varphi_{jk}) = P_{jk} [1 + i \cdot \text{tg}(\varphi_{jk})], \quad (1)$$

где φ_{jk} – сдвиг фазы полной мощности относительно ее активной составляющей.

Целевая функция и система ограничений на допустимые потери напряжений для всех распределительных устройств и потребителей существенно зависит от постановки задачи оптимизации [5].

Основная часть. Наиболее возможными могут быть следующие два варианта этой задачи. Если нас интересуют только резервы мощностей P_{jk} у заданных (существующих) потребителей, то независимыми переменными являются только мощности потребителей P_{jk} . Потери напряжений в ограничениях суммируются по всей цепи от источника до потребителей. Система ограничений в данном случае состоит из трех составляющих:

1. Ограничения на полный баланс токов линий электропередач, выраженных через полные мощности, для всех распределительных устройств сети (полагая все нагрузки в 3-фазных линиях симметричными):

$$\operatorname{Re}(\Delta I_j) = 0, \quad \operatorname{Im}(\Delta I_j) = 0, \quad \operatorname{Re}(\Delta I_0) = 0, \quad \operatorname{Im}(\Delta I_0) = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } \Delta I_0 = \alpha_0 \cdot S_0 - \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot S_j, \quad \Delta I_j = \alpha_j S_j - \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk}, \quad j = \overline{1, m},$$

$$\alpha_j = \frac{1}{U_j \cdot \sqrt{3}}, \quad \alpha_{jk} = \frac{1}{U_{jk} \cdot \sqrt{3}}, \quad \alpha_0 = \frac{1}{U_0 \cdot \sqrt{3}}, \quad U_j, \quad U_{jk}, \quad U_0 - \text{линейные}$$

напряжения на распределительных устройствах.

2. Ограничения на падения напряжений в каждой цепи от источника до распределительных устройств и потребителей:

$$\sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_0)^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_0)^2} \leq \Delta u_{0\text{дон}}; \quad \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_j)^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_j)^2} \leq \Delta u_{j\text{дон}};$$

$$\sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_{jk})^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_{jk})^2} \leq \Delta u_{jk\text{дон}},$$

$$\text{где } \Delta u_0 = z_0 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk}, \quad \Delta u_j = z_0 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk} + z_j \cdot \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk},$$

$$\Delta u_{jk} = z_0 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk} + z_j \cdot \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk} + z_{jk} \cdot \alpha_{jk} \cdot S_{jk}. \quad (3)$$

3. Ограничения на допустимые нагрузки на каждой линии электропередачи:

$$\sqrt{\operatorname{Re}(I_0)^2 + \operatorname{Im}(I_0)^2} \leq I_{0\text{дон}},$$

$$\sqrt{\operatorname{Re}(I_j)^2 + \operatorname{Im}(I_j)^2} \leq I_{j\text{дон}}, \quad (4)$$

$$\sqrt{\operatorname{Re}(I_{jk})^2 + \operatorname{Im}(I_{jk})^2} \leq I_{j\text{дон}},$$

где $I_0 = \alpha_0 \cdot S_0$, $I_j = \alpha_j \cdot S_j$, $I_{jk} = \alpha_{jk} \cdot S_{jk}$, $j = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, n_j}$.

Целевой функцией является сумма мощностей всех потребителей:

$$\Phi(S) = \sqrt{[\operatorname{Re} F(S)]^2 + [\operatorname{Im} F(S)]^2} \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$\text{где } F(S) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} S_{jk}. \quad (6)$$

Если необходимо оценить резерв пропускной способности всей сети (всех линий и распределительных устройств), а не только существующих потребителей, то независимыми неизвестными в ограничениях (2) являются все S_j , $j = \overline{1, m}$ и S_{jk} , $k = \overline{1, n_j}$. Тогда знаки равенства « \Rightarrow » необходимо заменить знаками неравенства « \geq », а функцию (6) записать следующим образом:

$$F(S) = \sum_{j=1}^m S_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} S_{jk} \rightarrow \max \quad (7)$$

В случае, когда коэффициенты мощности во всех звеньях схемы близки к единице, то в (2)-(5) можно учитывать только действительные части комплексных параметров сети.

Рассмотрим пример расчета для сети (см. рис. 2) по первому варианту постановки задачи. Сначала составим модель в общем виде. Для формулирования системы ограничений запишем баланс токов в распределительных устройствах P_2 и P_1 , и падения напряжений в комплексном виде. Баланс токов на распределительных устройствах равен:

$$\Delta I_2 = \alpha_{21} S_{21} + \alpha_{22} S_{22} + \alpha_{23} S_{23} - \alpha_2 S_2, \quad \Delta I_1 = \alpha_{11} S_{11} + \alpha_2 S_2 - \alpha_1 S_1, \quad (8)$$

а ограничения $\operatorname{Re}(\Delta I_1) = 0$, $\operatorname{Im}(\Delta I_1) = 0$, $\operatorname{Re}(\Delta I_2) = 0$, $\operatorname{Im}(\Delta I_2) = 0$.

Падения напряжений на входах распределительных устройств и у потребителей:

$$\Delta u_1 = z_1 \alpha_1 S_1 = z_1 (\alpha_{11} S_{11} + \alpha_{21} S_{21} + \alpha_{22} S_{22} + \alpha_{23} S_{23}),$$

$$\Delta u_2 = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 = z_1 (\alpha_{11} S_{11} + \alpha_{21} S_{21} + \alpha_{22} S_{22} + \alpha_{23} S_{23}) +$$

$$+ z_2 (\alpha_{21} S_{21} + \alpha_{22} S_{22} + \alpha_{23} S_{23}),$$

$$\Delta u_{11} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_{11} \alpha_{11} S_{11} \leq \Delta u_{11},$$

$$\Delta u_{21} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 + z_{21} \alpha_{21} S_{21}, \quad (9)$$

$$\Delta u_{22} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 + z_{22} \alpha_{22} S_{22},$$

$$\Delta u_{23} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 + z_{23} \alpha_{23} S_{23},$$

и ограничения для них:

$$\begin{aligned} \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_1)^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_1)^2} &\leq \Delta u_{1\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_2)^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_2)^2} &\leq \Delta u_{2\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_{11})^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_{11})^2} &\leq \Delta u_{11\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_{21})^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_{21})^2} &\leq \Delta u_{21\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_{22})^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_{22})^2} &\leq \Delta u_{22\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(\Delta u_{23})^2 + \operatorname{Im}(\Delta u_{23})^2} &\leq \Delta u_{23\text{доп}}. \end{aligned} \quad (10)$$

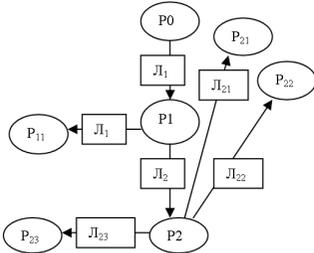


Рис. 2 – Пример радиальной сети

Система ограничений на предельно-допустимые токи в линиях имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sqrt{\operatorname{Re}(I_1)^2 + \operatorname{Im}(I_1)^2} &\leq I_{1\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(I_2)^2 + \operatorname{Im}(I_2)^2} &\leq I_{2\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(I_{11})^2 + \operatorname{Im}(I_{11})^2} &\leq I_{11\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(I_{21})^2 + \operatorname{Im}(I_{21})^2} &\leq I_{21\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(I_{22})^2 + \operatorname{Im}(I_{22})^2} &\leq I_{22\text{доп}}, \\ \sqrt{\operatorname{Re}(I_{23})^2 + \operatorname{Im}(I_{23})^2} &\leq I_{23\text{доп}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Необходимо также учесть ограничения на мощности существующих потребителей:

$$\operatorname{Re} S_{11} \geq P_{11,0}, \quad \operatorname{Re} S_{21} \geq P_{21,0}, \quad \operatorname{Re} P_{22} \geq P_{22,0}, \quad \operatorname{Re} P_{23} \geq P_{23,0}, \quad (12)$$

где $P_{11,0}, P_{21,0}, P_{22,0}, P_{23,0}$ – существующие нагрузки потребителей.

$$\text{Целевая функция } \Phi(S) = \sqrt{[\operatorname{Re} F(S)]^2 + [\operatorname{Im} F(S)]^2} \rightarrow \max,$$

где

$$F(S) = S_{11} + S_{21} + S_{22} + S_{23}. \quad (13)$$

Подставив из табл. 1 в (8)-(11) числовые значения заданных параметров электросети, приведенной на рис. 2, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= z_1 \alpha_1 S_1 = (0,05 + 0,002 \cdot i) \cdot 1,519 \cdot [P_{11}(1 + 0,62 \cdot i) + \\ &+ P_{21}(1 + 0,426 \cdot i) + P_{22}(1 + 0,512 \cdot i) + P_{23}(1 + 0,672 \cdot i)] = \\ &= \mathbf{0,074P_{11} + 0,075P_{21} + 0,074P_{22} + 0,074P_{23} + (0,05P_{11} +} \\ &\quad \mathbf{+ 0,0354P_{21} + 0,0419P_{22} + 0,054P_{23}) \cdot i}. \\ z_2 \alpha_2 S_2 &= (0,04 + 0,001 \cdot i) \cdot 1,519 \cdot [P_{21}(1 + 0,426 \cdot i) + \\ &+ P_{22}(1 + 0,512 \cdot i) + P_{23}(1 + 0,672 \cdot i)] = \\ &= \mathbf{0,067P_{21} + 0,06P_{22} + 0,0597P_{23} + (0,0274P_{21} + 0,0326P_{22} + 0,0423P_{23}) \cdot i}. \end{aligned}$$

Таблица 1 – Заданные параметры сети

Параметры линий	L_1	L_2	L_{11}	L_{21}	L_{22}	L_{23}
U , кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
r	0,05	0,04	0,1	0,09	0,08	0,06
x	0,002	0,001	0,006	0,004	0,003	0,002
$\cos(\varphi)$			0,85	0,92	0,89	0,83
$\operatorname{tg}(\varphi)$			0,620	0,426	0,512	0,672
P , кВт			P_{11}	P_{21}	P_{22}	P_{23}
$\operatorname{tg}(\varphi)$			$\operatorname{tg}(\varphi_{11})$	$\operatorname{tg}(\varphi_{21})$	$\operatorname{tg}(\varphi_{22})$	$\operatorname{tg}(\varphi_{23})$
α	1,48	1,48	1,519	1,519	1,519	1,519
Δu , В	10	12	15	15	15	25
P_{\min}	60	50	10	15	10	30
P_{\max}						

$$\begin{aligned} \Delta u_2 &= z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 = 0,074P_{11} + 0,075P_{21} + 0,074P_{22} + 0,074P_{23} + \\ &+ (0,05P_{11} + 0,0354P_{21} + 0,0419P_{22} + 0,054P_{23}) \cdot i + \\ &+ 0,067P_{21} + 0,06P_{22} + 0,0597P_{23} + (0,0274P_{21} + 0,0326P_{22} + 0,0423P_{23}) \cdot i = \\ &= \mathbf{0,074P_{11} + 0,135P_{21} + 0,134P_{22} + 0,134P_{23} +} \\ &\quad \mathbf{+ (0,05P_{11} + 0,0624P_{21} + 0,0745P_{22} + 0,0963P_{23}) \cdot i}. \\ \Delta u_{11} &= z_1 \alpha_1 S_1 + z_{11} \alpha_{11} S_{11} = 0,074P_{11} + 0,075P_{21} + 0,074P_{22} + 0,074P_{23} + \\ &+ (0,05P_{11} + 0,0354P_{21} + 0,0419P_{22} + 0,054P_{23}) \cdot i + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(0,1 + 0,006 \cdot i) \cdot 1,519 \cdot P_{11}(1 + 0,62 \cdot i) = \\
& = \mathbf{0,22P_{11} + 0,075P_{21} + 0,074P_{22} + 0,074P_{23}} + \\
& + (\mathbf{0,153P_{11} + 0,0354P_{21} + 0,0419P_{22} + 0,054P_{23}}) \cdot i . \\
\Delta u_{21} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 + z_{21} \alpha_{21} S_{21} = & 0,074P_{11} + 0,135P_{21} + 0,134P_{22} + 0,134P_{23} + \\
& +(0,05P_{11} + 0,0624P_{21} + 0,0745P_{22} + 0,0963P_{23}) \cdot i + \\
& +(0,09 + 0,004 \cdot i) \cdot 1,519 \cdot P_{21}(1 + 0,426 \cdot i) = \\
& = \mathbf{0,074P_{11} + 0,269P_{21} + 0,134P_{22} + 0,134P_{23}} + \\
& + (\mathbf{0,05P_{11} + 0,126P_{21} + 0,0745P_{22} + 0,0963P_{23}}) \cdot i . \\
\Delta u_{22} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 + z_{22} \alpha_{22} S_{22} = & 0,074P_{11} + 0,135P_{21} + 0,134P_{22} + 0,134P_{23} + \\
& +(0,079P_{11} + 0,0624P_{21} + 0,0745P_{22} + 0,0963P_{23}) \cdot i + \\
& +(0,08 + 0,003 \cdot i) \cdot 1,519 \cdot P_{22}(1 + 0,512 \cdot i) = \\
& = \mathbf{0,074P_{11} + 0,0135P_{21} + 0,253P_{22} + 0,134P_{23}} + \\
& + (\mathbf{0,05P_{11} + 0,0624P_{21} + 0,141P_{22} + 0,0963P_{23}}) \cdot i . \\
\Delta u_{23} = z_1 \alpha_1 S_1 + z_2 \alpha_2 S_2 + z_{23} \alpha_{23} S_{23} = & 0,074P_{11} + 0,135P_{21} + 0,134P_{22} + 0,134P_{23} + \\
& +(0,05P_{11} + 0,0624P_{21} + 0,0745P_{22} + 0,0963P_{23}) \cdot i + \\
& +(0,06 + 0,002 \cdot i) \cdot 1,519 \cdot P_{23}(1 + 0,672 \cdot i) = \\
& = \mathbf{0,074P_{11} + 0,135P_{21} + 0,134P_{22} + 0,223P_{23}} + \\
& + (\mathbf{0,05P_{11} + 0,0624P_{21} + 0,0745P_{22} + 0,16P_{23}}) \cdot i . \\
F(S) = P_{11}(1 + 0,62 \cdot i) + P_{21}(1 + 0,426 \cdot i) + P_{22}(1 + 0,512 \cdot i) + P_{23}(1 + 0,672 \cdot i) = \\
= P_{11} + P_{21} + P_{22} + P_{23} + (\mathbf{0,62P_{11} + 0,426P_{21} + 0,512P_{22} + 0,672P_{23}}) \cdot i . \\
Re(F(S)) = P_{11} + P_{21} + P_{22} + P_{23} \rightarrow \max .
\end{aligned}$$

Запишем заданные значения параметров и действительные части ограничений и целевой функции данной модели, воспользовавшись пакетом прикладных программ Microsoft Office 2003 [6]. В этом случае лист Excel представлен в виде табл. 2.

Оптимальный план распределения мощностей для данной задачи можно найти с помощью надстройки «Поиск решения» табличного процессора Excel ПК. Фрагмент листа Excel с данными и результатами вычислений представлен в табл. 3.

Таблица 2 – Фрагмент листа Excel с заданными параметрами сети

	A	B	C	D	E	F	G
1	Огранич.	P(1)	P(2)	P(1,1)	P(2,1)	P(2,2)	P(2,3)
2	по напр.	0	0	0	0	0	0
3	Δu(1)	0	10				
4	Δu(2)	0	12				
5	Δu(1,1)	0	15				
6	Δu(2,1)	0	15				
7	Δu(2,2)	0	15				
8	Δu(2,3)	0	15				
9	Огранич.						
10	по мощн.			10	15	10	20
11	F(X)	0					

Таблица 3 – Оптимальное решение

	A	B	C	D	E	F	G
1	Огранич.	P(1)	P(2)	P(1,1)	P(2,1)	P(2,2)	P(2,3)
2	по напр.	110,35	63,65	46,7	15	25,21	23,44
3	Δu(1)	8,1811	10				
4	Δu(2)	12	12				
5	Δu(1,1)	15	15				
6	Δu(2,1)	14,01	15				
7	Δu(2,2)	15	15				
8	Δu(2,3)	14,086	15				
9	Огранич.						
10	по мощн.			10	15	10	20
11	Re(F(S))	110,35					

Рассмотрим теперь трехфазную кольцевую электросеть (рис. 3) из m распределительных устройств PP_j , $j = \overline{1, m}$ подключенную к источнику электроэнергии PP_0 с напряжением U_0 . Полный ток в каждом звене L_j кольцевой магистрали можно выразить как сумму слагаемых частей всех токов потребителей (суперпозицию токов). Запишем сумму токов

потребителей, подключенных к одному распределительному устройству PP_j , $j = \overline{1, m}$ в следующем виде:

$$I_j = \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk}, \quad (14)$$

где $\alpha_{jk} = \frac{1}{U_{jk} \sqrt{3}}$, а токи I_{jl} в каждой линии L_j от нагрузок всех потребителей подключенных к магистрали можно вычислить по следующим формулам:

$$I_{j1} = \frac{S_1 \cdot \sum_{l=2}^{m+1} z_l + S_2 \cdot \sum_{l=3}^{m+1} z_l + \dots + S_j \cdot \sum_{l=j+1}^{m+1} z_l + \dots + S_m \cdot z_{m+1}}{\sum_{l=1}^{m+1} z_l},$$

$$I_{j2} = \frac{-S_1 \cdot z_1 + S_2 \cdot \sum_{l=3}^{m+1} z_l + \dots + S_j \cdot \sum_{l=j+1}^{m+1} z_l + \dots + S_m \cdot z_{m+1}}{\sum_{l=1}^{m+1} z_l},$$

.

$$I_{jj} = \frac{-S_1 \cdot z_1 - S_2 \cdot (z_1 + z_2) - \dots - S_{j-1} \cdot \sum_{l=1}^{j-1} z_l + S_j \cdot \sum_{l=j+1}^{m+1} z_l + \dots + S_m \cdot z_{m+1}}{\sum_{l=1}^{m+1} z_l}, \quad (15)$$

.

$$I_{jm} = \frac{-S_1 \cdot z_1 - S_2 \cdot (z_1 + z_2) - \dots - S_{m-1} \cdot \sum_{l=1}^{m-1} z_l + S_m \cdot z_{m+1}}{\sum_{l=1}^{m+1} z_l},$$

$$I_{j,m+1} = \frac{-S_1 \cdot z_1 - S_2 \cdot (z_1 + z_2) - \dots - S_{m-1} \cdot \sum_{l=1}^{m-1} z_l - S_m \cdot z_{m+1}}{\sum_{l=1}^{m+1} z_l}.$$

Падения напряжений и ограничения на них для каждого потребителя можно записать в общем виде как

$$\Delta u_{jk} = \alpha_{jk} \cdot S_{jk} \cdot z_{jk} + \sum_{l=1}^j I_{jl} \cdot z_l, \quad (16)$$

$$j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, n_j}, \quad \sqrt{(\operatorname{Re} \Delta u_{jk})^2 + (\operatorname{Im} \Delta u_{jk})^2} \leq \Delta u_{jk \text{ доп}}.$$

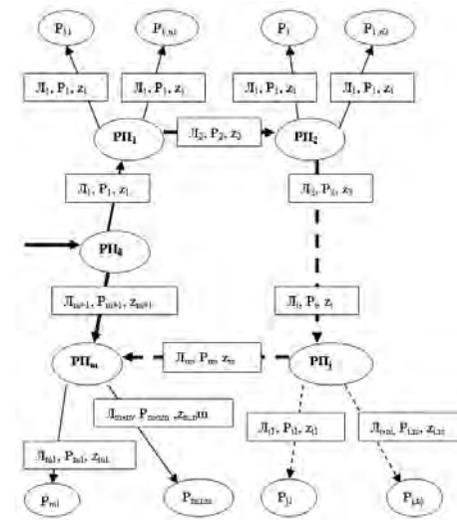


Рис. 3 – Схема кольцевой сети

Ограничения по балансу токов в распределительных устройствах:

$$\operatorname{Re}(\Delta I_0) = 0, \quad \operatorname{Im}(\Delta I_0) = 0, \quad \operatorname{Re}(\Delta I_j) = 0, \quad \operatorname{Im}(\Delta I_j) = 0,$$

где $\Delta I_0 = I_{l0} - I_{l1} + I_{l,m+1}$,

$$\Delta I_j = I_{lj} + I_{l,j+1} - \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} \cdot S_{jk}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (17)$$

Ограничения на диапазоны допустимых нагрузок линий у потребителей:

$$|S_j| \leq |S_{j \max}|, \quad P_{jk0} \leq \operatorname{Re} S_{jk} \leq P_{jk \max} \quad (18)$$

$$j = \overline{1, m+1}, \quad k = \overline{1, n_k},$$

где $|S_j| = \sqrt{(\operatorname{Re} S_j)^2 + \operatorname{Im}(S_j)^2}$, $|S_{j \text{ доп}}| = \sqrt{(\operatorname{Re} S_{j \text{ доп}})^2 + \operatorname{Im}(S_{j \text{ доп}})^2}$.

Целевая функция:

$$\Phi(S) = \sqrt{[\operatorname{Re} F(S)]^2 + [\operatorname{Im} F(S)]^2} \rightarrow \max, \quad (19)$$

$$F(S) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} S_{jk}.$$

Рассмотрим пример составления модели для кольцевой сети показанной на рис. 4.

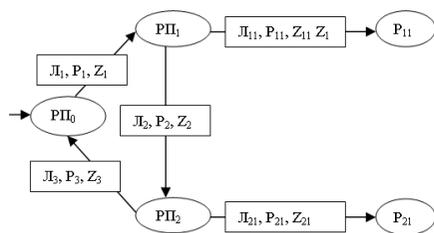


Рис. 4 – Пример кольцевой сети

Выражения для вычисления I_{ij} , $j = \overline{1,3}$; α_{kj} , $j = \overline{1,2}$ согласно (15):

$$\begin{aligned} I_{.1} &= S_{11} \cdot \frac{z_2 + z_3}{z_1 + z_2 + z_3} + S_{21} \cdot \frac{z_3}{z_1 + z_2 + z_3}, \\ I_{.2} &= -S_{11} \cdot \frac{z_1}{z_1 + z_2 + z_3} + S_{21} \cdot \frac{z_3}{z_1 + z_2 + z_3}, \\ I_{.3} &= -S_{11} \cdot \frac{z_1}{z_1 + z_2 + z_3} - S_{21} \cdot \frac{z_1 + z_2}{z_1 + z_2 + z_3}. \end{aligned} \quad (20)$$

Ограничения по падениям напряжений у потребителей имеют вид:

$$\Delta u_{11} = \{\alpha_{11} \cdot S_{11} \cdot z_{11} + z_1 \cdot I_{.1}\}, \quad \Delta u_{21} = \{\alpha_{21} \cdot S_{21} \cdot z_{21} + z_2 \cdot I_{.2}\}. \quad (21)$$

Ограничения по падениям напряжений на распределительных устройствах:

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= \left(\alpha_{11} \cdot S_{11} \cdot \frac{z_2 + z_3}{z_1 + z_2 + z_3} + \alpha_{21} \cdot S_{21} \cdot \frac{z_3}{z_1 + z_2 + z_3} \right) \cdot z_1, \\ \Delta u_2 &= \left(\alpha_{21} \cdot S_{21} \cdot \frac{z_1 + z_3}{z_1 + z_2 + z_3} - \alpha_{11} \cdot S_{11} \cdot \frac{z_1}{z_1 + z_2 + z_3} \right) \cdot z_2, \end{aligned} \quad (22)$$

$$|\Delta u_{11}| \leq \Delta u_{11, \text{доп}}, \quad |\Delta u_{21}| \leq \Delta u_{21, \text{доп}}, \quad |\Delta u_1| \leq \Delta u_{1, \text{доп}}, \quad |\Delta u_2| \leq \Delta u_{2, \text{доп}},$$

где $|\Delta u_{jk}| = \sqrt{\text{Re}(\Delta u_{jk})^2 + \text{Im}(\Delta u_{jk})^2}$.

Ограничения по мощностям распределительных устройств и потребителей:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\Delta S_0) &= 0, \quad \text{Im}(\Delta S_0) = 0, \\ \text{Re}(\Delta S_1) &= 0, \quad \text{Im}(\Delta S_1) = 0, \\ \text{Re}(\Delta S_2) &= 0, \quad \text{Im}(\Delta S_2) = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \Delta S_0 &= (S_0 - S_1 - S_2 - \Delta S_1 - \Delta S_2 - \Delta S_{11} - \Delta S_{21}), \\ \Delta S_1 &= (S_1 - S_{11} - S_2 - \Delta S_{11} - \Delta S_2) = 0, \\ \Delta S_2 &= (S_2 + S_3 - S_{21} - \Delta S_{21}), \\ |S_0| &\leq |S_{0\text{max}}|, \quad |S_1| \leq |S_{1\text{max}}|, \quad |S_2| \leq |S_{2\text{max}}|, \quad P_{11\text{min}} \leq \text{Re}(S_{11}), \\ P_{21\text{min}} &\leq \text{Re}(S_{21}). \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, вид целевой функции выглядит как суммарная мощность, которую может передать вся сеть ко всем потребителям:

$$\Phi(P) = P_{11} + P_{21} \rightarrow \max. \quad (25)$$

Выводы. В статье рассмотрен метод математического программирования (условная оптимизация) для моделирования сетей электроснабжения в сочетании с вычислительными и программными возможностями современных компьютеров. Данный подход позволяет проводить исследование сетей в условиях их эксплуатации и модернизации с целью принятия оптимальных решений по их использованию. Подобный подход может быть применен при оптимизации распределения потоков мощностей для минимизации общих потерь в сетях, а также для решения задач с дискретными изменениями мощностей. Оптимальный план распределения мощностей с использованием данной методики найден с помощью Microsoft Office Excel.

Список литературы: 1. Лыкин А.В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов : учеб. пособие / А.В. Лыкин. – Новосибирск : НГТУ, 2003. – 134 с. 2. Таласов А.Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена // А.Г. Таласов. – Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 20-25. 3. Паздерин А.В. Проблема моделирования распределения потоков электрической энергии в сети / А.В. Паздерин. – Электричество. – 2004. – № 10. – С. 2-4. 4. Акулич И.Л. Экономико-математические методы и модели. Компьютерные технологии и решения / И.Л. Акулич. – Минск : БГЭУ, 2003. – 167 с. 5. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій / Ю.П. Зайченко. – Київ : ЗАТ „ВПОЛ”, 2000. – 215 с. 6. Леснікова І.Ю. Дослідження операцій у середовищі електронних таблиць / І.Ю. Леснікова, Н.В. Халіпова, М.В. Терещенко та інш. – К. : Центр учб. літератури, 2007. – 184 с.

Поступила в редколлегию 01.01. 2013

УДК 519.8(075.8); 621.31.017

Метод математического программирования для принятия решения модернизации электросетей / Мегель Ю. Е., Руденко А. П., Рыбалка А. И., Данилко И. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – №.17 (990). – С.142-154. Бібліогр.: 6 назв. Іл.:4. Табл.:3.

У статті розглядається задача оптимального розподілу потоків потужності в мережах електропостачання. Мета - прийняття рішення про раціональне використання можливостей існуючих електромереж. Обґрунтовано оцінку максимально-допустимої загальної переданої

потужності в разі забезпечення заданих обмежень по потужності і напругам на розподільчих пунктах і у споживачів.

Ключові слова: мережа електропостачання, оптимізація, розподіл потужностей, мінімізація втрат, пропускна здатність, моделювання.

In article consider the problem of optimal distribution of power flows in electricity networks. The purpose - to decide on the rational use of existing power grids. Assess the validity of maximum allowable total transmit power while ensuring the specified constraints on power and voltage on the points and the consumers.

Keywords: electricity network, optimization, power distribution, reduced waste, throughput, simulation

УДК 62.83.52.0313

А.А. ТКАЧЕНКО, асс., НТУ «ХПИ»;

А.В. ОСИЧЕВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»

СНИЖЕНИЕ ТОКОВЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В РЕГУЛИРУЕМОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШАХТНОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА ПРИ ЗАКЛИНИВАНИИ ЦЕПИ

Предложен способ снижения динамических нагрузок в регулируемом асинхронном электроприводе скребкового конвейера без гидромурфты при заклинивании цепи. По результатам компьютерного моделирования показана работоспособность способа, получена зависимость пикового ускорения звездочки натяжной станции от места заклинивания цепи по длине конвейера.

Ключевые слова: скребковый конвейер, гидромурфта, регулируемый электропривод, заклинивание.

Введение. Эксплуатация забойных скребковых конвейеров сопровождается частыми пусками (до 400 раз в сутки [1]), а также стопорениями цепи, при которых броски пусковых токов приводных асинхронных двигателей 4-6кратно превышают среднее значение и негативно влияют на «слабую» шахтную систему электроснабжения, а также на работу электрооборудования добычного участка. Пуско-предохранительные гидромурфты в таких тяжелых режимах работы малоэффективны из-за нагрева рабочей жидкости и срабатывания тепловой защиты, следствием чего являются простои конвейера и снижение производительности. Поэтому в процессе модернизации скребковых конвейеров у производителей и у энергетиков шахт все больший интерес вызывают современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с векторным управлением. Так, проведенные в [2] исследования показали, что замена нерегулируемого электропривода конвейера СР72 с гидромурфтой на регулируемый электропривод с векторным управлением без гидромурфты обеспечивает различные режимы плавного пуска, ограничивает токовую нагрузку на сеть в пределах заданной уставки, существенно улучшает динамические свойства всей электромеханической системы, однако не исключает возможности порыва цепи при заклинивании рабочей ветви.

Цель исследования. Оценка работоспособности способа снижения динамических нагрузок в регулируемом асинхронном электроприводе скребкового конвейера без гидромурфты при заклинивании цепи по результатам компьютерного моделирования.

А.А. Ткаченко, А.В. Осичев, 2013

Результаты исследования. Исключение гидромфты из конструкции скребкового конвейера требует решения задачи автоматического определения момента заклинивания цепи с последующим аварийным остановом конвейера. Исследуемые авторами способы [3] определения момента заклинивания цепи скребкового конвейера СР72 посредством оценки максимального значения и скорости нарастания тока статора асинхронного двигателя показали, что сигнал на отключение привода в рассматриваемых системах возникает только после нагружения всех кинематических звеньев конвейера от точки заклинивания до двигателя. Такое запаздывание во времени (30-50 мс) ограничивает эффективность применения рассмотренных в [3] способов аварийного останова конвейера, которые, однако, снижают динамические нагрузки в цепи при заклинивании более эффективно по сравнению с гидромфтой при условии своевременного (без запаздывания) определения момента заклинивания.

Кинематическая схема промышленно выпускаемых скребковых конвейеров с хвостовой приводной станцией, в которых тяговое усилие от приводной звездочки передается на рабочую ветвь через звенья холостой ветви, позволяет реализовать разработанный авторами способ снижения динамических нагрузок в цепи при заклинивании и защищенное патентом устройство [4]. Суть способа (рис. 1) заключается в том, что скребковый конвейер, состоящий из регулируемого асинхронного привода 1, редуктора 2, приводной звездочки 3, через которую тяговое усилие передается на скребковую цепь 4 и звездочки 5 натяжной станции оснащается датчиком угла ее поворота 6, сигнал с которого подается на блок двукратного дифференцирования 7 и далее обеспечивает возможность заблаговременного торможения.

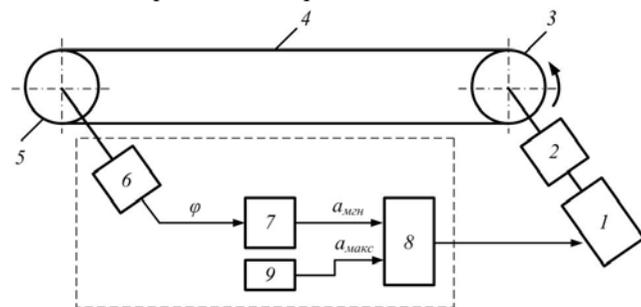


Рис. 1 – Структурная схема реализации способа определения момента заклинивания цепи

После пуска конвейера в ходе его нормальной работы с постоянной средней скоростью в установившемся режиме мгновенное ускорение $a_{\text{мгн}}$ звездочки, которое непрерывно рассчитывается в блоке двукратного дифференцирования 7, мало. При заклинивании цепи 4 волна усилий распространяется от точки заклинивания, которая находится на рабочей ветви конвейера, по рабочей ветви к звездочке 5 натяжной станции, вызывая резкое (импульсное) увеличение ее ускорения, так как она имеет малый момент инерции по сравнению с ротором двигателя. Волна, затормозив звездочку натяжной станции, проходит дальше по холостой ветви к приводной станции и будет нагружать ее звенья, если с этого момента не предпринять мер по снижению динамических усилий в цепи. Пороговый элемент 8, обнаружив превышение ускорения звездочки выше заданного в задатчике верхнего порога 9 уровня $a_{\text{макс}}$, выдает сигнал на регулируемый асинхронный электропривод 1, который обеспечивает различные (промышленно реализованные) способы аварийного торможения конвейера.

Подтверждение работоспособности заявленного способа проведем на разработанной авторами компьютерной модели скребкового конвейера СР72 с хвостовой приводной станцией и регулируемым асинхронным электроприводом с системой векторного управления без гидромфты [2]. Такая модель позволяет исследовать пуск в режиме токоограничения и плавный пуск конвейера, его работу на определенной скорости транспортирования, а также заклинивание цепи от различных причин.

На рис. 2 представлен график ускорения звездочки натяжной станции, снятый с компьютерной модели незагруженного конвейера при заклинивании рабочего органа по причине попадания скребка в рештак. После разгона конвейера в режиме токоограничения и выхода его на рабочую скорость моделируется мгновенный останов скребка посередине рабочей ветви.

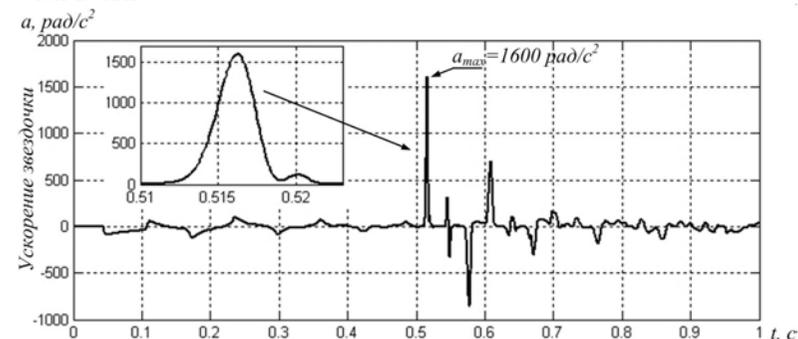


Рис. 2 – График ускорения звездочки натяжной станции

Из рассмотрения процесса, представленного на рис. 2, можно сделать вывод, что стандартный энкодер с 10000 импульсами на оборот успешно выделяет импульсное угловое перемещение звездочки натяжной станции, вызванное прохождением волны деформаций от заклинивания, а численное дифференцирование по методу трех точек позволяет получить сигнал ускорения звездочки и надежно выделить его из среднего шумящего значения вычисляемого ускорения в неаварийных режимах. Максимальное значение углового ускорения звездочки натяжной станции при заклинивании цепи посередине рабочей ветви достигает 1600 рад/с^2 , а при пуске конвейера не превышает 100 рад/с^2 .

Обобщение результатов моделирования (рис. 3) показало зависимость максимального значения ускорения звездочки натяжной станции от места заклинивания цепи по длине рабочей ветви конвейера в пределах $a_{max}=1300...2800 \text{ рад/с}^2$. По мере приближения точки заклинивания к натяжной станции пиковое ускорение ее звездочки плавно увеличивается, а на расстоянии 10 м и ближе этот эффект выражен сильнее. Полученная обобщающая зависимость позволяет правильно выбрать порог срабатывания устройства защиты [4] при наладке системы управления конвейера.

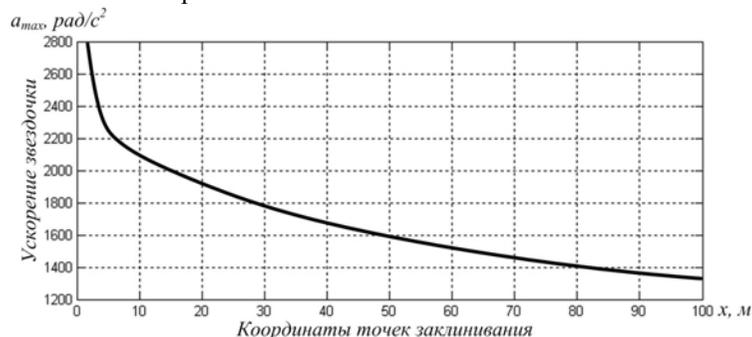


Рис. 3 – Зависимость максимальной величины ускорения звездочки натяжной станции от места заклинивания

Эффективность предложенного решения по снижению динамических нагрузок в цепи скребкового конвейера СР72 с хвостовой приводной станцией и регулируемым асинхронным электроприводом без гидромолоты при заклинивании цепи оценим, сравнив трехмерные пространственно-временные диаграммы динамических процессов усилий $F(x,t)$, полученные на модели. Значение предварительного натяжения цепи равно $F_{пн}=44 \text{ кН}$, провис отсутствует, моделируемая цепь обладает

упругостью при растяжении и «сжатии» относительно уровня предварительного натяжения.

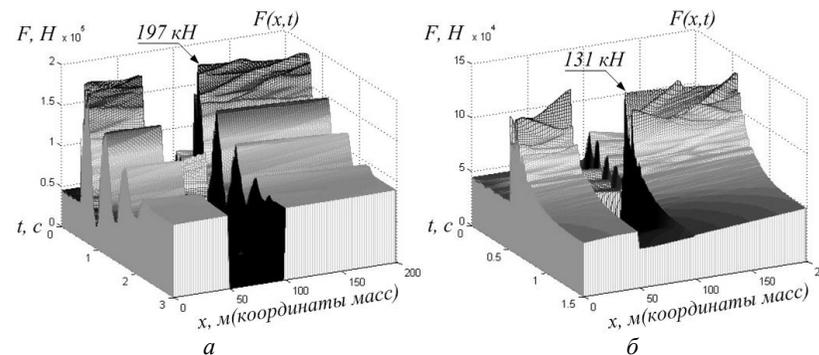


Рис. 4 – Динамические усилия в цепи конвейера: а – без средств снижения динамических нагрузок; б – с применением устройства защиты [4]

Из графика (рис. 4, а) видно, что мгновенный останов скребка вызывает значительные колебания усилий в цепи на участке от точки заклинивания через холостую ветвь и далее к приводной станции. Без принятия мер по снижению динамических нагрузок амплитуда первого пика возрастает до 197 кН с учетом $F_{пн}$, однако не превышает разрывное усилие цепи калибра 18×64 конвейера СР72, равное 252 кН . Нарастание усилий в цепи происходит по мере нагружения привода с одновременным снижением его скорости (вплоть до остановки) за счет перехода кинетической энергии, запасенной в останавливающихся инерционных массах в потенциальную энергию растяжения цепи. Возникшие от заклинивания колебания затухают за 4 периода, двигатель, не преодолев причину заклинивания, останавливается и создает стопорный статический момент, натягивая цепь до уровня 89 кН с учетом $F_{пн}$.

В случае применения устройства защиты цепи от перегрузки (рис. 4, б) кинетическая энергия вращающегося двигателя гасится в ходе его экстренного торможения под воздействием системы управления, движущий момент не создается, цепь ослабляется (не натягивается). В результате распространяющаяся по холостой ветви волна деформаций от заклинивания производит меньшее ударное действие по механической части приводной станции, снижая первый пик до уровня 131 кН с учетом $F_{пн}$, колебания усилий в цепи не возникают.

Выводы. 1. В статье показана работоспособность способа снижения динамических нагрузок в регулируемом асинхронном электроприводе скребкового конвейера без гидромукты при заклинивании цепи.

2. Построена обобщающая зависимость величины пикового ускорения звездочки натяжной станции от места заклинивания цепи, которая позволяет правильно выбрать порог срабатывания устройства защиты при наладке системы управления конвейера.

3. Токовые нагрузки на шахтную сеть можно снизить, применяя регулируемый асинхронный электропривод с устройством защиты цепи от перегрузки.

Список литературы: 1. *Ещин Е.К.* Теория предельных режимов работы горных машин / *Е.К. Ещин*. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1995. – 232 с. 2. *Ткаченко А.А.* Анализ динамических процессов в регулируемом асинхронном электроприводе скребкового конвейера СР72 / *А.А. Ткаченко, А.В. Осичев, А.Б. Богаевский* // *Электромеханика и энергозберігаючі системи*. – Кременчук: Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, 2012. – №3/2012 (19). – Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – С. 168–171. 3. *Ткаченко А.А.* Оценка эффективности способов экстренного торможения скребкового конвейера СР72 при заклинивании рабочего органа / *А.А. Ткаченко* // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – №28. – Тем. вип. „Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – С. 402–405. 4. Пат. 74793 Україна, ПМК В65G 43/00. Пристрій захисту ланцюга скребкового конвеєра від перевантаження при заклинюванні / *Осичев О.В., Ткаченко А.О.*; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». – № у 2012 05202; заявл. 27.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. №21.

Поступила в редколлегию 03.02.2012

УДК 62.83.52.0313

Снижение токовых и динамических нагрузок в регулируемом асинхронном электроприводе шахтного скребкового конвейера при заклинивании цепи / Ткаченко А.А., Осичев А.В. // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - № 17 (990). – С.155-160. Іл.: 4. Бібліогр.: 4 назв.

Запропоновано спосіб зниження динамічних навантажень в регульованому асинхронному електроприводі скребкового конвеєра без гідромукты при заклинюванні ланцюга. За результатами комп'ютерного моделювання показана працездатність способу, отримана залежність пикового прискорення зірки натяжної станції від місця заклинювання ланцюга по довжині конвеєра.

Ключові слова: скребковий конвеєр, гідромукта, регульований електропривод, заклинювання.

A method of reduction of dynamic loadings in the regulated asynchronous electric drive scraper conveyor without fluid coupling at jamming chain is proposed. According to the results of computer simulation confirmed efficiency of the method, the obtained dependence of peak acceleration of an sprocket of tension station from the place of jamming in the chain conveyor length.

Key words: longwall armored face conveyor, fluid coupling, adjustable electric drive, jamming.

УДК 621.315

В.В. ЧЕРКАШИНА, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПІ»

ВРАХУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

В статті показано необхідність врахування інформації про параметри навколишнього середовища при проектуванні повітряних ліній в рамках концепції Smart Grid, що дозволить вирішити задачу по впровадженню в практику проектування повітряних ліній нового покоління.

Ключеві слова: повітряна лінія, потужність, параметри навколишнього середовища, Smart Grid.

Вступ. Розвиток електроенергетичної галузі в рамках екстенсивної концепції, заснованої переважно на введенні нових потужностей і розвитку мережевої інфраструктури з поліпшенням техніко-економічних показників окремих видів устаткування, об'єктів і технологій, пов'язаний з наявністю системних обмежень і, відповідно, ризиків розвитку електроенергетичної галузі, що вимагає перегляду традиційних підходів, принципів і механізмів її функціонування, розробку нових напрямків, здатних забезпечити її стійкий розвиток, підвищення споживчих властивостей і ефективності використання електричної енергії.

Це рішення зажадало розробки нової концепції розвитку електроенергетичної галузі, яка б максимально враховувала основні тенденції і напрямки науково-технічного прогресу в усіх галузях, сферах життя і діяльності суспільства. Такою концепцією є Smart Grid.

Аналіз останніх досліджень і літератури. Концепція Smart Grid – це концепція повністю інтегрованої, саморегулюючої та самовідновлюючої електроенергетичної системи, котра має мережеву топологію і включає всі джерела, що генеруються, магістральні та розподільчі мережі, а також всі види споживачів електроенергії та керуються єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв і систем в режимі реального часу [1-6].

Smart Grid розділяють на наступні напрямки: економічно ефективні технології малої і середньої генерації, включаючи альтернативні джерела; нове покоління облаштувань автоматизації (АСК ТП, РЗА і ін.); інформаційно-технологічні комплекси для управління ЕЕС; активні засоби регулювання (FACTS); ПЛ нового покоління і система моніторингу параметрів ПЛ в режимі реального часу [1-3]. В рамках даної концепції ПЛ розглядаються як об'єкт, що контролюється і відповідно регулюється.

© В.В. Черкашина, 2013

Функціонування Smart Grid неможливе без ефективної ієрархічної системи координованого неможливе без ефективної ієрархічної системи координованого управління режимами електроенергетичної галузі в цілому. Для створення такої системи необхідно використати широкий спектр новітніх технічних засобів [1, 3-6].

Нині ведуться розробки ефективніших систем моніторингу в рамках концепції Smart Grid, які передбачають можливість прогнозування зміни ситуації на основі моніторингу параметрів об'єктів електричної мережі. Ідея такого аналізу полягає в тому, щоб реальному часі відстежувати зміни в електричній мережі по окремих складових, що мають певні властивості. Основою Smart Grid є взаємозв'язане застосування: облаштувань FACTS; сучасних цифрових автоматизованих облаштувань управління і передачі інформації; системи моніторингу стану і діагностики об'єктів в реальному часі [5].

Одними з базових елементів Smart Grid є повітряні лінії (ПЛ) нового покоління. Для вирішення цього питання за кордоном і в країнах СНД проводяться дослідження і розробки по створенню і застосуванню не просто компактних ПЛ, а компактних керованих ПЛ зі зменшеними міжфазними відстанями в порівнянні з традиційними ПЛ. Особливістю робіт є те, що вони спрямовані на створення ПЛ нового покоління [1,5].

Мета досліджень. Показати необхідність врахування інформації про параметри навколишнього середовища при проектуванні повітряних ліній в рамках концепції Smart Grid, що дозволить вирішити задачу по впровадженню в практику проектування повітряних ліній нового покоління.

Матеріали дослідження. ПЛ нового покоління в рамках концепції Smart Grid являється об'єктом електричної мережі, який контролюється. Контроль параметрів ПЛ відбувається за допомогою датчиків температури проводів, що дозволяє керувати величиною потужності, що передається по ПЛ з урахуванням інформації про параметри навколишнього середовища. Конструкція ПЛ безпосередньо пов'язана з її пропускною здатністю. Так при проектуванні ПЛ серед її технічних характеристик закладаються і граничні рівні положення проводів відносно землі. Подовження проводів призводить до так званої термічної деградації, коли за тих же метеорологічних умов рівень максимально допустимих струмів ПЛ різко знижується, що веде до зростання числа аварійних випадків. Тому у рамках концепції Smart Grid важлива інформація про параметри навколишнього середовища в районі майбутньої експлуатації ПЛ [3-6].

Для реалізації цього у рамках концепції Smart Grid потрібні технічні засоби і програмне забезпечення системи збору, передачі, обробки і зберігання інформації. [5].

Згідно [7], для визначення величини потужності, що передається по ПЛ використовуються «постійні» значення активного і індуктивного опорів, що не є коректним у рамках концепції Smart Grid. Тому, посилаючись на наукові обґрунтування, приведені в [7], але при цьому використовуючи «змінне» значення активного опору, тобто з урахуванням температури проводів залежно від параметрів навколишнього середовища, формула для розрахунку величини потужності, що передається по ПЛ матиме вигляд:

$$P_{\text{перев}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{R_{(t_{\text{пр}}^0)}} \cdot \frac{\sqrt{\left(\cos \phi + \frac{X}{R_{(t_{\text{пр}}^0)}} \sin \phi\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{X}{R_{(t_{\text{пр}}^0)}}\right)^2\right]}{1 + \left(\frac{X}{R_{(t_{\text{пр}}^0)}}\right)^2} - \left(\cos \phi + \frac{X}{R_{(t_{\text{пр}}^0)}} \sin \phi\right) \quad (1)$$

де $R_{(t_{\text{пр}}^0)}$ - активний опір проводів з урахуванням температури проводів залежно від параметрів навколишнього середовища, Ом; X - індуктивний опір проводів, Ом.

Відповідно до вище викладеного матеріалу і [7,8] проведена оцінка пропускної здатності 1 км одноланцюгової ПЛ 110 кВ з урахуванням температури проводів залежно від параметрів навколишнього середовища при гранично допустимому струмі [7].

Результати досліджень пропускної здатності 1 км одноланцюгової ПЛ 110 кВ з урахуванням температури проводів залежно від параметрів навколишнього середовища при гранично допустимому струмі представлено в таблиці.

Таблиця – Результати досліджень

$t_{0.c.}$ °C	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$t_{\text{пр}}$ °C	-12,51	-0,27	12,12	24,68	37,42	50,37	63,54	76,97	90,69
P , МВт	106,28	103,67	101,12	98,62	96,18	93,80	91,46	89,16	86,91

Як видно з таблиці 1 при незмінному струмовому навантаженні залежно від параметрів навколишнього середовища змінюється температура проводів, що відображається на пропускній здатності ПЛ.

Проведені дослідження показують, що при проектуванні ПЛ інформація про параметри навколишнього середовища дозволить оптимізувати величину потужності, яка буде передаватися по ПЛ.

Висновок. Інформація про параметри навколишнього середовища повинна враховуватися при проектуванні повітряних ліній в рамках концепції Smart Grid, що дозволить вирішити задачу по впровадженню в практику проектування повітряних ліній нового покоління.

Список літератури: 1. Кобец Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова - М.: ИАЦ Энергия, 2010.-208 с. 2. Стогній Б.С. Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 44–50. 3. Титов Н.Н. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии/ Н.Н. Титов, Н.М. Черемисин, П.Д. Лежнюк и др. // Праці інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонній контрактів і балансууючого ринку. – 2009. – С. 41–48. 4. Черемисин Н.М. Стратегия выбора оптимального решения при проектировании воздушных линий электропередачи / Н.М. Черемисин, В.И. Романченко, В.В. Черкашина // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця:ВНТУ.- 2012.- №2.- С.115 – 118. 5. Лежнюк П.Д. Повышение эффективности управления режимами электрических сетей на базе мониторинга параметров воздушных линий и окружающей среды / П.Д. Лежнюк, Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина и др. // Электрические сети и системы.-Київ: ТОВ "Гнозіс"– 2012. – №5. – С. – 39-46. 6. Черемисин Н.М. Повышение эффективности АСУ ТП подстанций за счет мониторинга параметров воздушных линий и окружающей среды на базе платформы SMART GRID / Н.М. Черемисин, В.М. Зубко, А.В. Холод, В.В. Черкашина // Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка / Технічні науки.-Харків: ХНТУСГ. –2012.– Вип.129.– С.14 – 16. 7. Рокотяна С.С. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич и др. / Под редакцией С.С. Рокотяна и И.М. Шаниро. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с. 8. Правила улаштування електроустановок. – Харків: "Індустрія", 2007.– 416 с.

Поступила в редколлегию 05.03.2013

УДК 621.315

Врахування параметрів навколишнього середовища в задачах проектування повітряних ліній / Черкашина В.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика; надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.161-164. Табл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

В статті показана необхідність урахування інформації про параметрах навколишнього середовища при проектуванні повітряних ліній в рамках концепції Smart Grid, которая позволит решить задачу по внедрению в практику проектирования воздушных линий нового поколения.

Ключевые слова: воздушная линия, мощность, параметры окружающей среды, Smart Grid.

In the article the necessity of account of information is shown about the parameters of environment at the choice of planning air-tracks within the framework of conception Smart Grid, that will allow to decide a task in practice of planning air-tracks new generation.

Keywords: : air-tracks, power, parameters of environment, Smart Grid.

УДК 621.315.2

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн.наук.,проф., НТУ «ХПІ»;
Т.Ю. АНТОНЕЦ, технолог, ЗАТ «Завод Південкабель», Харків

КІНЕТИКА НАГРІВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитотою поліетиленовою ізоляцією.

Ключові слова: силовий високовольтний кабель, тривало допустимий струм, теплоємність.

Вступ. Найважливішою споживчою властивістю силових кабелів, яка визначає його ліквідність, є спроможність до навантаження та перевантаження (в подальшому, - пропускна спроможність). Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією характерними особливостями є: більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює одножилну конструкцію кабелю, та як наслідок, особливості їх прокладання і використання, наприклад, прокладання у площині з обов'язковою транспозицією електропровідних екранів при заземленні їх на обох кінцях лінії. Крім того для них характерна підвищена допустима температура ізоляції, суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури(питома теплоємність поліетилену за температури 20 °С становить 2300 Дж/кг·°С, а за 80 °С становить 3750 Дж/кг·°С). Тому методи визначення пропускної спроможності в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки: і розрахунком, і експериментально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для прийняття економічно виважених рішень при визначенні пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, необхідне вирішення системи рівнянь, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

В [1] нами запропоновано метод 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.

© Л.А.Щебенюк, Т.Ю.Антонец, 2013

Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах і в умовах експлуатації [2]. Найбільш простою і уживаною є експоненційна модель нагрівання кабелю, яка для режиму включення (тобто за температури довкілля $t = 0$; $\tau = 0$) [3]:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)], \quad (1)$$

де β – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір $\beta = C S$, β параметром кінетики нагрівання кабелю.

Ця модель є наближеною. Досвід її застосування свідчить про прийнятну для практичних задач точність за умови, що за її допомогою порівнюють характеристики подібних конструкцій кабелів. Зокрема для теплових розрахунків кабелів у нестационарних режимах, якщо товщина ізоляції невелика відносно розмірів жили [3]. Якщо товщина ізоляції силового кабелю значна, що характерно для високовольтних кабелів, при визначенні перевантажувальної спроможності необхідно врахувати наявність в ізоляції перепаду температур. В такому разі використовують метод зосереджених теплоємностей [4]. Найпростіша модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

$$\tau = P \cdot [S_g \cdot (1 - e^{-g t}) + S_f \cdot (1 - e^{-f t})], \quad (2)$$

де g, f – постійні, складові кінетики нагрівання даного кабелю.

Ціль і задачі дослідження. Порівняти кінетику нагрівання кабелю за моделями (1) і (2) для високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією АПвПЕг $1 \times 1300 - 220$ з метою визначення впливу теплоємності жили на кінетику нагрівання кабелю за моделлю (2).

Матеріал дослідження. За методом зосереджених теплоємностей ізоляція кабелю представлена у вигляді двох зон із рівними величинами теплового опору $S_{i31} = S_{i32} = S_{i3}/2$, але з різними теплоємностями: $C_{i31} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r)$; $C_{i32} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r)$, де c_{i3} – питома об'ємна теплоємність ізоляції. Відповідну схему наведено на рис.1. Параметри схеми визначає коефіцієнт p (коефіцієнт Ван Вормера [4]: $p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}$); $S_1 = S_{i31}$; $S_2 = S_{i32}$; $C_1 = p C_{i31} + C_{ж}$; $C_2 = (1-p) C_{i31} + C_{i32}$.

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при $t = 0$, $\tau = 0$, перегрів проводу в момент t : описує (2), де $g = [M + (M^2 - N)^{0.5}]/N$; $f = [M - (M^2 - N)^{0.5}]/N$; $M = 0,5[C_1(S_1 + S_2 + S_d) + C_2(S_2 + S_d)]$; $N = C_1 S_1 C_2 (S_2 + S_d)$; $S_g = (g - f)^{-1} [C_1^{-1} - f(S_1 + S_2 + S_d)]$; $S_f = (S_1 + S_2 + S_d) - S_g$, де P – потужність тепловиділення в проводі в кінці короткотермінового (менше 1 години) режиму нагрівання.

Як приклад, для кабелю АПвПЕг $1 \times 1300 - 220$ результати розрахунків кривих нагрівання за моделями (1) і (2) наведені на рис. 2.

Теплові параметри: питомий тепловий опір ізоляції $\sigma_{i3} = 3,7$ °См/Вт, захисних покривів $\sigma_{зп} = 3$ °См/Вт; тепловий опір ізоляції $S_{i3} = 0,424$ °См/Вт; тепловий опір довкілля $S_d = 0,93$ °См/Вт; коефіцієнт теплопередачі в

повітря $\alpha = 8$ Вт/ °См²; теплоємність жили $C_{ж} = 3236$ Дж/°С·м; теплоємність ізоляції, прилеглої до жили $C_{i31} = 4327$ Дж/°С·м; теплоємність зовнішнього шару ізоляції $C_{i32} = 8889$ Дж/°С·м.

Параметри схеми заміщення, в якій теплоємності зображені електричними ємностями (див.рис.1): $S_1 = S_2 = 0,212$ °См/Вт; коефіцієнт Ван Вормера: $p = (\ln(47,9/20,9))^{-1} - ((47,9/20,9) - 1)^{-1} = 0,441$; $C_1 = p C_{i31} + C_{ж} = 5143$ Дж/°С·м; $C_2 = (1-p) C_{i31} + C_{i32} = 11310$ Дж/°С·м.

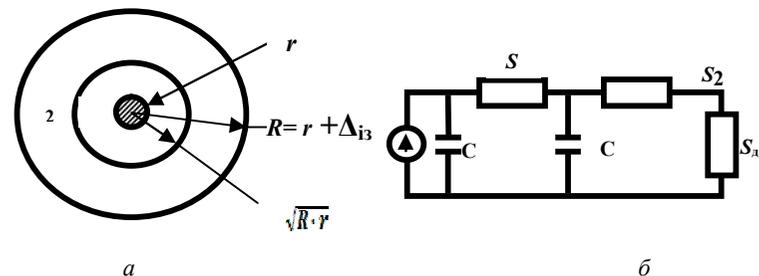


Рис. 1 - Схема моделі нагрівання *a* - ізольованого проводу в повітрі; *б* - відповідна схема заміщення

Рис. 2 свідчить про те, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією обидві моделі дають практично однакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму**. Але для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки кінетика нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

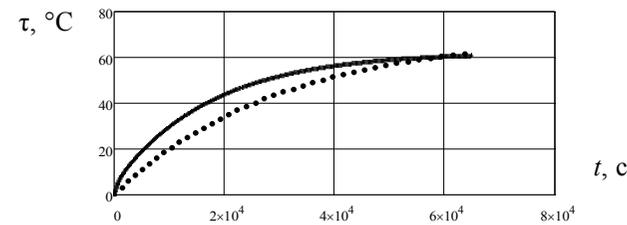


Рис. 2 – Криві перегріву τ кабелю АПвПЕг $1 \times 1300 - 220$ за моделями: пунктир – модель (1); суцільна – модель (2)

Аналіз складових кривих нагрівання кабелю АПвПЕг $1 \times 1300 - 220$ (рис.3), що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження і розраховані за моделями (1) і (2), свідчить, що різниця

між значеннями півгодинного перегріву кабелю за традиційною моделлю (1) $\tau\beta$ і

півгодинного перегріву за другою складовою моделі (2) $\tau_2 = P \cdot [S_f \cdot (1 - e^{-f \cdot t})]$ не перевищує 2 °С. Такою різницею можна було б знехтувати. Але, по-перше, ця різниця з часом збільшується, а, по-друге, різниця між значеннями півгодинного перегріву кабелю за традиційною моделлю (1) $\tau\beta$ і півгодинного перегріву за сумою складових моделі (2) $\tau = \tau_1 + \tau_2$ перевищує 6 °С і ця різниця з часом збільшується. Тому при визначенні перевантажувальної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією за наведеними результатами розрахунків доцільно використання методу зосереджених теплоємностей (модель (2)).

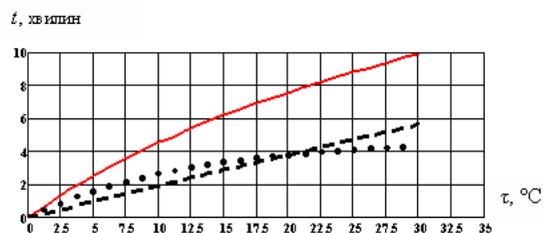


Рис. 3 – Складові кривих нагрівання кабелю АПвПЕг 1×1300 – 220, що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження: суцільна: $\tau = \tau_1 + \tau_2$ (модель (2)); пунктир: τ_1 ; штрихова: τ_2

В той же час 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. Вибір значень параметрів і розрахункових моделей має бути обґрунтованим технічно. Економічні складові визначення пропускної спроможності відображені в стандарті ДСТУ ІЕС60287-3-3:2012, але вони стосуються виключно економічних аспектів в умовах експлуатації.

Для експериментального визначення теплових параметрів кабелю, зокрема параметра теплопередачі в оточуюче середовище, в його конструкцію вмонтовано спай чотирьох однакових термодатчиків, які мають лінійну залежність термо-ЕРС аж до температури 350 °С («мідь-константан» з коефіцієнтом термо-ЕРС 0.05 мВ/К). Термодатчики розташовані в жилі, в ізоляції, в оболонці, і на поверхні кабелю таким чином, щоб мінімально впливати на температуру в місці спаю. Одержані криві нагрівання ізоляції кабелю свідчать про те, що модель (2) теж є наближеною. Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного за (2).

Тому необхідне експериментальне дослідження кінетики нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості їх конструкції.

Результати досліджень. 1) Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією відомі розрахункові моделі дають практично однакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму** і таким чином діючі нормативні документи є застосовними. 2) Для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки кінетика нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції. 3) Експериментальне дослідження кінетики нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів свідчить про те, що модель (2) для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили теж є досить наближеною і спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного, визначеного за (2).

Список літератури: 1. *Щебенюк Л.А.* До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. // *Л.А. Щебенюк, Т.Ю. Антоненко* // Вісник НТУ «ХП», – Харків: НТУ «ХП», 2011. – Вип.42.– С. 43 – 46. 2. ДСТУ ІЕС60287-1-1:2012. КАБЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНІ. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1 – 1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення. 3. *Карпушенко В.П.* Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. // *В.П. Капушенко, Л.А. Щебенюк, О.А. Науменко, Антоненко Ю.О.*; Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 4. *Ларина Э.Т.* Силовые кабели и кабельные линии: [учебн. Пособие для вузов]/ Э.Т. Ларина – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

Поступила в редколлегию 05. 0 .2013

УДК 621.315.2

Кінетика нагрівання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією / *Л.А.Щебенюк, Т.Ю.Антоненко* // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП»,– 2013. – №.17 (990). – С.165-169. Бібліогр.:4 назви. Іл.:3.

Виконан аналіз результатів розрахунків пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів з поліетиленовою ізоляцією.

Ключевые слова: силовой высоковольтный кабель, длительно допустимый ток, теплоемкость.

The analysis of data of current calculation of the rating of cables at direct voltages up to 220 kV. The work is devoted to creation of a system of method for calculation of the current rating of high-voltage cables.

Keywords: power high-voltage cable, protractedly possible current, heat capacity.

С.А. ЩЕРБИНА, асп., НТУ «ХП»

ОСОБЛИВОСТІ РАДІАЦІЙНОГО МОДИФІКУВАННЯ ФТОРВМІСНИХ ПОЛІМЕРІВ

Виконано аналіз можливостей радіаційного модифікування полімерів. Показано, що доза опромінення для отримання процесу зшивки фторвмісних полімерів повинна визначатися для кожного матеріалу окремо.

Ключові слова: радіаційне модифікування, фторвмісні полімери, технічна доза опромінення.

Вступ.

Проводи та кабелі з радіаційно-зшитою полімерною ізоляцією виробляються промисловістю багатьох країн та застосовуються в системах зв'язку, війсьній, авіаційній та космічній техніці, електронному та комп'ютерному обладнанні, автомобільних електричних схемах, ядерних установках, тощо [1].

Так, зокрема, розвиток авіаційної промисловості неможливий без застосування авіаційних проводів та кабелів, електрична ізоляція яких повинна мати високі діелектричні властивості, бути стійкою до дії радіації, низької температури, пожежобезпечною. В більшій мірі таким вимогам відповідає ізоляція на основі політетрафторетилену (ПТФЕ). Перш за все, завдяки високим діелектричним властивостям, унікальним фізико-хімічним характеристикам, термічній стійкості. Зі всіх відомих полімерів ПТФЕ (фторопласт-4) має найбільше значення кисневого індексу КІ) - 96. Для порівняння: КІ поліетилену дорівнює 16 – 18, для полівінілхлориду – 32 – 36. Але основний недолік ПТФЕ – низька радіаційна стійкість. Гранична доза опромінення при експлуатації становить 10 кГр, що на 2 – 3 порядки нижче типових значень для других полімерів [2-3]. Тому радіаційно не модифікований політетрафторетилен практично не застосовується сам по собі в якості електричної ізоляції кабелів та проводів авіаційної, космічної техніки та атомної промисловості. У вигляді стрічок шляхом обмотки цей матеріал накладається на жилу, зверху – поліамідні стрічки. Поліамідна ізоляція має високу радіоактивну стійкість. Але цей матеріал дуже дорогий. Тому більш доцільнішим технічним засобом є підвищення радіаційної стійкості політетрафторетилену та матеріалів на його основі. Це дозволить застосовувати такі матеріали в якості електричної ізоляції, яка накладається традиційними методами екструзії на відміну від фторопласта -4.

© С.А.Щербіна, 2013

Ціллю статті є аналіз особливостей радіаційного модифікування фторвмісної полімерної ізоляції кабелів.

Радіаційне модифікування полімерів.

Радіаційне модифікування полімерних матеріалів – це цілеспрямована якісна зміна електричних, механічних, теплових та інших властивостей в результаті опромінювання [1, 4 - 5].

Радіаційне модифікування полімерів має свої переваги та недоліки.

До переваг слід віднести: універсальність, тобто можливість модифікування широкого спектру полімерів різної хімічної структури; чистота продукту та екологічна чистота процесу, тобто «безреагентні технології – немає необхідності використовувати ініціатори, прискорювачі зшивки; твердофазні технології при звичайній температурі, що виключає застосування розчинників та високі температури.

Недоліки: висока вартість обладнання (часткове рішення – нові економічні та компактні прискорювачі); вимоги до кваліфікації персоналу (можливі ризики); обмеження по масі (товщині) матеріалу, який радіаційно модифікується (нові прискорювачі високих енергій частково вирішують це обмеження, рис.1[6]).

Найбільше розповсюдження в радіаційних технологіях отримали електронні прискорювачі. Електронні пучки та пучки гальмового γ - випромінювання, які отримують на електронних прискорювачах, широко застосовуються для радіаційного модифікування матеріалів, радіаційної полімеризації, в радіаційно-фізичних технологіях.

Радіаційна технологія підрозділяється на радіаційно-фізичну, радіаційно-хімічну.

Сучасне радіаційно-хімічне модифікування полімерів розвивається, головним чином, в наступних напрямках:

1.Об'ємне модифікування, яке, в свою чергу, направлено на радіаційну зшивку макромолекул або на радіаційну деструкцію макромолекул (Таблиця 1).

2. Поверхневе модифікування: окиснення та прищеплювальна полімеризація.

3. Модифікація сумішей полімерів та композитів (міжфазне зшивання).

Радіаційне зшивання макромолекул призводить до підвищення міцності, термостійкості, формостабільності, електричних характеристик, зниження розчинності. Типові дози опромінювання становлять від 20 до 250 кГр.

Структурні наслідки радіаційно-хімічних процесів наведено на рис.2: зшивка (поперкова (а) та кінцева (б), деструкція (в).



Рис.1 Прискорювач ЕЛВ – 8

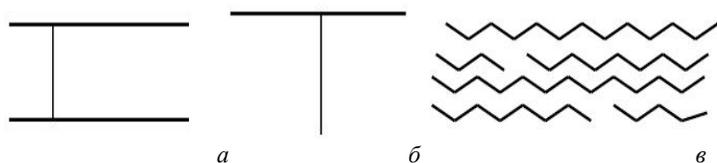


Рис.2 Схематичне зображення процесів зшивки (а, б) та деструкції (в)

Радіаційна деструкція макромолекул призводить до зниження міцності, зростанню розчинності, що забезпечує вторинну переробку полімерних матеріалів. Умовна оцінка радіаційної чутливості полімерів наведена в таблиці 2: Список дано в порядку зниження чутливості до радіації, тобто зростання стійкості зверху вниз [7].

Найбільш часто іонізуюче випромінювання застосовується для модифікації полімерів, оскільки внаслідок високої молекулярної маси полімеру навіть невеликі дози можуть визвати суттєву зміну властивостей. Найбільш важливим в практичному відношенні радіолітичним перетворенням в полімерах є зшивка. Зшивка використовується в різноманітних промислових процесах, насамперед, для модифікування

поліолефінової (поліетиленової та полівінілхлоридної) ізоляції кабелів та проводів, термоусаджувальних трубок та плівок.

Таблиця 1 – Здатність полімерів до зшивання або деструкції при опроміненні в вакуумі

Переважає процес зшивки	Переважає процес деструкції	Рівнозначні процеси зшивки - деструкції
Полібутадиєн	Поліізобутилен	Поліпропилен
Сополімери бутадієна	Політетрафторетилен (фторопласт)	
Полісілоксани	Поліметилметакрилат (органічне скло)	
Поліакрилова кислота	Целюлоза	
Полістирол	Полівініловий спирт	
Поліакрилати	Полікарбонат	
Поліаміди	Поліетилентерефталат (лавсан)	
Полівінілхлорид		

Таблиця 2 – Радіаційна чутливість полімерів

Чутливі до радіації	Стійкі
Поліізобутилен	Поліаміди
Політетрафторетилен	Поліетилакрилат
Поліметилметакрилат	Поліетилентерефталат
Поліпропилен	Полістирол
Целюлоза	
Поліетилен	
Полівінілхлорид	
Полікарбонат	

Радіаційна зшивка призводить до підвищення механічної міцності, термостійкості, покращенню електроізоляційних властивостей. Джерелами іонізуючого випромінювання для опромінення кабелів та проводів є електронні прискорювачі з енергіями 0,3 – 5 Мев та потужністю до сотні кВт. Необхідна доза для зшивання поліетилену становить 200 – 400 кГр і може бути значно знижена шляхом введення в поліетилен сенсбілізаторів – речовин, які запобігають підвищенню чутливості поліетилену до дії іонізуючого опромінювання. Застосування

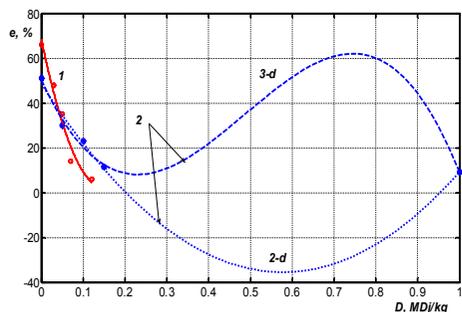


Рис.4 – Вплив дози опромінення на високо еластичне відновлення фторвмісних полімерів

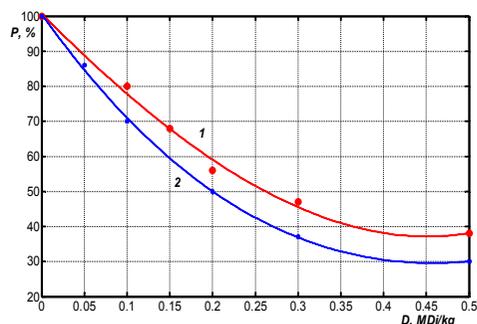


Рис.5 – Вплив дози опромінення на деформацію при продавленні фторвмісних полімерів

Так, для фторопласту 40Ш апроксимація сплайнами другого (2-d) та третього (3-d) порядків (рис.4) показує, що в діапазоні відсутності даних хід залежностей може бути різний. Фізично це може бути обумовлено процесами деструкції (верхня крива) або зшивки (нижня крива) [8 - 9].

Висновки.

Таким чином, при застосуванні фторвмісних полімерів цілком доцільно технічно визначити значення оптимальної дози опромінення для кожного матеріалу окремо.

При перевищенні необхідної дози можливі "переопромінення" ізоляції та втрата нею необхідних властивостей. Обґрунтування технічної дози опромінення повинно вестись в достатньо широкому діапазоні з дискретним кроком, який становить 0, 1 0, 2 Мдж/кг (10 20 кРад).

За деформацією при продавленні важко визначити критичну дозу, при якій процеси деструкції починають домінувати над процесами зшивки (див. рис.5).

Більш інформативними показниками для визначення технологічної дози опромінення є усадка та високо еластичне відновлення.

Список літератури: 1. Фінкель Э.Э. Кабели и провода для энергетических установок/ Э.Э. Фінкель. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136с. 2. Беспрозванных А.В. Влияние ионизирующего излучения на емкость и тангенс угла диэлектрических потерь сетевых кабелей / А.В. Беспрозванных, Е.В. Морозова, А.Н.Соколенко // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ». –2003. – Вып.9, т.4. – С. 3 – 8. 3. Беспрозванных А.В. Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения / А.В.Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.В. Морозова // Электротехника и электромеханика. – Харьков. – 2006. – № 3. – С. 82 – 86. 4. Пешков И.Б.Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / И.Б.Пешков. М.: Машиностроение, 2011. 367с. 5. Дикерман Д.Н. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией / Д.Н.Дикерман, В.С.Кунегин. М.: Энергоиздат, 1982. 145 с. 6. Забаев В.Н. Применение ускорителей в науке и промышленности / В.Н.Забаев. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 7. . M.R Cleland. High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing. Radiation Processing of Polymers, Hanser Publishers, Munich, and Oxford University Press, New York (1992) p. 23. 8. Беспрозванных А.В. Потеря массы сетевого кабеля при радиационно-тепловом старении / А.В.Беспрозванных, Б.Г.Набока, В.Я.Гладченко [и др.] // Пожарная безопасность кабельно-проводниковой продукции: научно-практичная конференция, 26 листопада 2003р.: матеріали конференції. – Харків, 2003. – с.10 – 13. 9. Беспрозванных А.В. Изменение механических свойств материалов конструктивных элементов оптических кабелей под действием радиации / А.В.Беспрозванных, Б.Г.Набока, Е.В.Морозова// Вісник НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. –№7.

Надійшла до редколегії 17.12.2012

УДК 621.315

Особенности радиационного модифицирования фторвмісних полімерів / Щербина С.А.

// Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПИ». – №.17 (990). – С.170-177. Бібліогр.: 9 назв. Табл.:3. Іл.:5.

Виконаний аналіз можливостей модифікування полімерів. Показано, що доза облучения фторсодержащих полимеров для получения процесса сшивки должна определяться для каждого материала отдельно.

Ключевые слова: радиационное модифицирование, фторсодержащие полимеры, техническая доза облучения.

The analysis of possibilities of modifying of polymers is made. It is shown, that the dose of an irradiation of polymers with the maintenance of fluorine for process vulcanization should be defined for each material separately.

Keywords: radiating modifying, polymers with the maintenance of fluorine, a technical dose of an irradiation.

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Д. Н. БАКЛАЙ, асс., НТУ «ХПИ»;
Т. А. ОСТРИКОВА, студентка, НТУ «ХПИ»;
Н. Ю. МЕЛЬНИК, студентка, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ДЕФЕКТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТНОШЕНИЙ ПАР ГАЗОВ И ГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ДЕФЕКТОВ

Выполнена оценка достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов. Установлено, что наибольшее значение достоверности при распознавании типа дефекта трансформатора, может быть получено при одновременном использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Ключевые слова: образ дефектов, отношения пар газов, частичные разряды.

Вступлення. В настоящее время для определения характера прогнозируемого дефекта в высоковольтных трансформаторах, действующим в Украине нормативным документом [1] предусмотрено использование, как отношений пар газов, так и графических образов дефектов. Несмотря на то, что обе диагностические схемы основаны на том, что каждому из возможных дефектов соответствует свой спектр газов (по которому и определяется как, наличие, так и тип прогнозируемого дефекта), процедуры диагностики при их применении отличаются. Это может привести к тому, что диагнозы поставленные с помощью этих диагностических схем для одного и того же объекта будут различаться. В связи с этим, возникает задача оценки достоверности принятия решений при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Анализ последних исследований и литературы. Вопросам оценки достоверности методов интерпретации результатов хромотографического анализа (ХАРГ) посвящено достаточно много исследований. Так с 1990 г. [2] рабочей группой СИГРЭ 15.01, при исследовании трансформаторов сравнивались методы, разрешенные к применению различными национальными или ведомственными правилами в дополнение к международному стандарту МЭК 699. Анализ показал большое различие в нормах и критериях оценки состояния трансформаторов. Соответственно различные методы интерпретации результатов измерений приводят к разным выводам.

© О.В.Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А.Острикова, Н.Ю.Мельник, 2013

Было установлено, что ни один метод не пригоден для универсального применения. В [3] на основе результатов ХАРГ по 250 трансформаторам имеющим дефекты, была выполнена оценка диагностической ценности наиболее известных методов интерпретации. Установлено, что наибольшей диагностической ценностью (93%) обладает методика МЭК (IEC 60599). Там же отмечено, что отношения концентраций анализируемых газов обладают условной диагностической ценностью поскольку, они позволяют распознать вид дефекта, при превышении граничных концентраций хотя бы одного газа углеводородного ряда. В тоже время, в открытых литературных источниках отсутствует информация о достоверности распознавания типов дефектов при использовании графических образов дефектов для интерпретации результатов ХАРГ.

Цель исследований. В статье, выполнен анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Материалы исследований. Для определения типа прогнозируемого дефекта в Украине [1] используются следующие отношения пар газов: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, CO_2/CO , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ и O_2/N_2 .

Отношение CH_4/H_2 используется для случаев, когда водород является газом с максимальной концентрацией, а следующим газом по концентрации является метан. Это отношение указывает на наличие частичных разрядов, в этом случае его значение меньше 0,1. Также отношение CH_4/H_2 используется для диагностирования дефектов термического характера, при которых его значения превышают 1.

Отношение $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ указывает на наличие частичных разрядов малой и большой энергии, достаточной для образования ацетилена в значительных количествах. При таких дефектах значение отношения превышает единицу и растет с увеличением мощности разрядов. Для устойчивого дугового разряда значение отношения достигает 5. Использование этого отношения для результатов ХАРГ из бака контактора устройства переключения позволяет выявить возможное наличие в нем аномального нагрева, в случае если значение отношения составляет меньше 1,5.

Отношение $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ является основным при определении термических дефектов. Величина данного отношения растет с увеличением температуры в зоне дефекта. При температурах в диапазоне до 300-350 °С это отношение меньше единицы, при температуре 350 °С – приблизительно равно единице и увеличивается до 4 при температуре 700 °С.

Отношение CO_2/CO может указывать на повреждение целлюлозной изоляции. В случае термического повреждения бумажной изоляции с температурой в зоне дефекта, меньше 150 °С, это отношение больше 10, а

при температуре более 250 °С – меньше 3. Данное отношение дает достоверные результаты при достаточно высоких концентрациях этих газов, не менее 0,5 % об. для CO₂ и 0,05 % об. для CO. Следует учесть, что оба газа в не меньшем количестве чем при повреждениях целлюлозы, могут образовываться при термическом окислении масла, особенно в негерметичном оборудовании при свободном доступе кислорода.

Отношение C₂H₂/H₂ используется для трансформаторов с устройством РПН и может указывать на нарушение герметичности между основным баком трансформатора и баком устройства переключения. Образовавшиеся газы через неплотности могут попадать в основной бак. В таком случае отношение обычно равно двум и более, а концентрация C₂H₂, не менее 30×10⁻⁶ о.е. Так как водород менее растворим в трансформаторном масле, чем ацетилен, последний быстрее диффундирует из бака РПН в основной бак диффундирует только малое количество водорода. В результате в трансформаторном масле количество ацетилена становится больше, чем водорода.

Отношения O₂/N₂. Кислород и азот могут попадать в масло в результате прямого контакта с воздухом в негерметичном оборудовании, или из-за нарушения пленочной или азотной защиты в герметичном оборудовании. Когда значение отношения O₂/N₂ снижается до 0,2 и меньше, в негерметичном оборудовании, можно диагностировать окислительные процессы аномально высокой интенсивности. Такое отношение в основном, является характерным для герметичного оборудования, но при высокой интенсивности окислительных процессов может иметь место и в негерметичном оборудовании. При условии достижения равновесной растворимости O₂ и N₂ отношения этих газов в масле приблизительно равно 0,5. Для определения типа дефекта с помощью отношений пар газов использовался табличный метод, который приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Определение типа дефекта по трем основным отношениям газов

Тип дефекта	Код дефекта	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
Нормальное старение масла	N	Hx	0,1–1	<0,2
Частичные разряды	ЧР	Hx	<0,1	<0,2
Разряды низкой энергии	P1	>1	0,1–0,5	>1
Разряды высокой энергии	P2	>1	0,1–1	>2
Ползучий разряд	P3	<1	0,3–0,5	>5
Термический дефект 150-300 °С	T1	Hx	>1	<1
Термический дефект 300-700 °С	T2	Hx	>1	1–4
Термический дефект >700 °С	T3	<0,2	>1	>4
Примечание Hx – нехарактерное отношение. Для данного типа дефекта не рассматривается.				

Вид развивающихся в трансформаторах дефектов можно определить графически по основным газам: водороду, метану, этилену, этану и ацетилену. Для этого определяется газ, имеющий максимальную абсолютную концентрацию. Определяются отношения каждого из пяти газов к газу, имеющему максимальную концентрацию. Далее строятся графики. Для этого по оси абсцисс откладываются пять равных отрезков, и обозначаются полученные точки соответствующими газами в следующей последовательности: H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂. По оси ординат откладывается отрезок произвольной величины, и обозначается цифрой "1". Далее для каждого газа по оси ординат необходимо отложить соответствующую величину отношения a_i / a_{maxi} . Полученные точки соединяются прямыми линиями. Построенный график сравнивается с эталонными графиками и определяется характер дефекта.

В качестве исходных данных использовались результаты ХАРГ по 100 трансформаторам с установленным видом дефекта. Суть исследований сводилась к сравнению реального диагноза с диагнозами, поставленными по отношениям пар газов и графическим образам дефектов.

Результаты исследований. Выполненное сравнение показало достаточно высокую достоверность постановки диагноза как при использовании отношений пар газов, так и с помощью графических образцов дефектов. Принципиально важно, что ни для одного из 100 анализируемых трансформаторов отношения пар газов не соответствовали нормальному состоянию. Другими словами, вероятность пропуска дефекта является крайне низкой.

При использовании отношений пар газов полное совпадение поставленного и реального диагнозов составило 96%. Т.е. правильный диагноз получен для 96 из 100 исследуемых трансформаторов. В 4 случаях при постановке диагноза возникли затруднения. Значения концентраций растворенных в масле газов и значения отношений пар газов для данных трансформаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения концентраций и значения отношений пар газов для 4 трансформаторов с нечеткими диагнозами, полученными при диагностике по отношениям пар газов

№	Концентрации газов, % об.					Отношения пар газов		
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
1	0,064	0,043	0,005	0,26	0,022	0,0192	0,671	11,818
2	0,041	0,0274	0,0022	0,068	0,0069	0,0323	0,668	9,855
3	0,27	0,025	0,024	0,03	0,007	0,8	0,0925	4,285
4	0,004	0,0077	отсут.	0,0018	0,0027	-	1,925	0,666

Как видно из табл. 2 все дефекты, по которым возникли затруднения с постановкой диагноза, являются комбинацией дефектов термического и электрического типов. Так в трансформаторе №1 (ТДГ-31500/110) выявлены следы разрядов и перегрев гетинаксовой прокладки и железа стыкового магнитопровода. Из табл. 2 видно, что ключевым газом с максимальной концентрацией является этилен. Т.е. прогнозируемый дефект имеет термический характер с температурой более 700 °С, о чем свидетельствует значение отношения C_2H_4/C_2H_6 . Значения отношения C_2H_2/C_2H_4 меньше 0,2, что также характерно для дефекта ТЗ (табл. 1). Но значение отношения CH_4/H_2 меньше единицы, что не характерно для данного диагноза.

Аналогичная ситуация наблюдается и в трансформаторе №2 (ТДЦТ-125000/220). При вскрытии данного трансформатора выявлен высокотемпературный перегрев магнитопровода со следами разрядов. Газом с максимальной концентрацией является этилен, а значения отношений пар газов идентичны трансформатору №1.

В трансформаторе №3 (ТДЦ-400000/330) выявлены следы разряда и выгорание магнитопровода. Максимальную концентрацию имеет водород, что указывает на наличие электрических разрядов. Однако следующим по концентрации газов является не метан (что характерно для частичных разрядов), а этилен. Несмотря на это отношение CH_4/H_2 меньше 0,1, что указывает на наличие частичных разрядов, но при этом отношение C_2H_4/C_2H_6 значительно превышает значение 0,2, что не позволяет однозначно установить диагноз.

Причиной вывода из эксплуатации автотрансформатора №4 (АТДЦТГУ-120000/220) оказались неустойчивые короткие замыкания из нижнего яра магнитопровода на дно бака. Но при этом, как видно из таблицы 2 ключевым газом является метан, а отношения пар газов соответствуют термическому дефекту с температурой 150-300 °С. Таким образом для трансформатора №4 имеет место постановка ошибочного диагноза.

Графические образы дефектов для этих трансформаторов приведены на рис. 1.

Сравнивая образы дефектов, приведенные на рис. 1 с эталонными образцами дефектов из СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 легко увидеть, что образы дефектов трансформаторов №1 и №2 (см. рис. 1.1 и 1.2) соответствуют сумме двух образов высокотемпературному нагреву и разрядам, что полностью совпадает с действительным диагнозом. Образ дефекта трансформатора №3 (см. рис. 1.3) соответствует частичным разрядам с нагреванием, а в трансформаторе №4 (см. рис. 1.4) образ дефекта соответствует нагреванию, переходящему в частичные разряды.

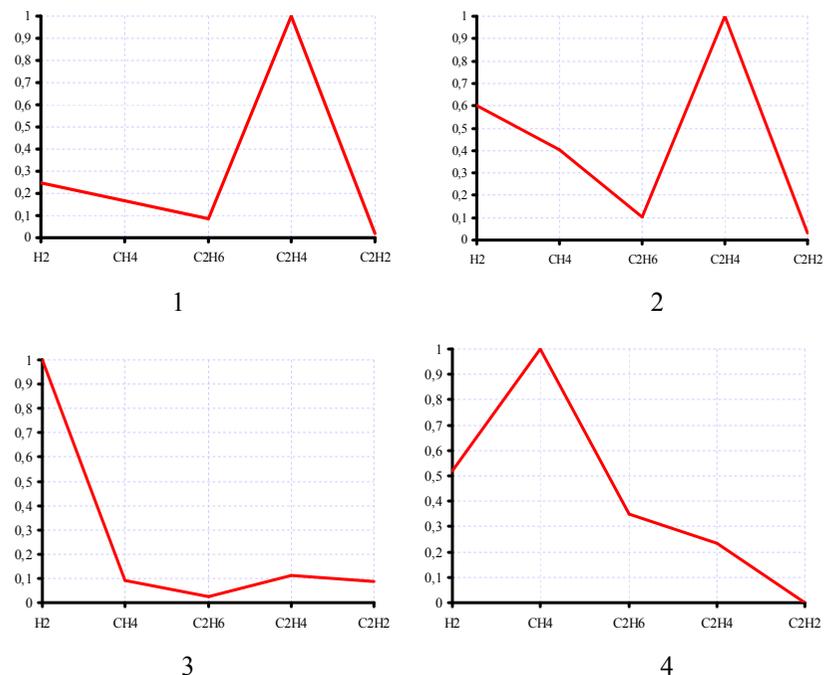


Рис. 1 – Графические образы дефектов для 4 трансформаторов с нечеткими диагнозами, полученными при диагностике по отношениям пар газов

Таким образом, использование графических образов дефектов позволило установить правильный диагноз в тех случаях, когда использование отношений пар газов вызвало затруднение при постановке диагноза.

В тоже время, при использовании графических образов дефектов полное совпадение поставленного и реального диагнозов составило 94%, что является более низким показателем по сравнению с отношением пар газов. Рассмотрим подробнее данные трансформаторы. Графические образы дефектов приведены на рис. 2, а значения концентраций растворенных в масле газов, значения отношений пар газов и типы дефектов данных трансформаторов приведены в табл. 3.

Как видно из рис. 2.1 образ дефекта в трансформаторе ТДН-16000/150 соответствует дуговому разряду. Отношения пар газов из

табл. 3 также соответствуют разрядам высокой энергии. Однако причиной роста концентраций газов в баке трансформатора являлся не дуговой разряд, а нарушения герметичности бака устройства РПН, что вызвало попадание масла из бака РПН в бак трансформатора. Уточнить характер повреждения и не допустить ошибочного вывода трансформатора из эксплуатации позволило отношение C_2H_2/H_2 , значение которого равно 2.

Таблица 3 – Значения концентраций и значения отношений пар газов для 6 трансформаторов, с нечеткими диагнозами, полученные при диагностике с помощью графических образов дефектов

№	Концентрации газов, % об.					Отношения пар газов				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ C ₂ H ₄	CH ₄ H ₂	C ₂ H ₄ C ₂ H ₆	CO ₂ CO	C ₂ H ₂ H ₂
1	0,0012	0,0006	0,0024	0,0018	0,00015	1,333	0,5	12	-	2
2	0,00301	0,00981	0,00017	0,0394	0,00231	0,0043	3,259	17,05	10,5	-
3	0,03	0,0095	0,0111	0,0113	0,0016	0,982	0,316	7,062	-	-
4	0,005	0,001	0,81	0,039	0,009	20,769	0,2	4,333	-	-
5	0,094	0,043	0,247	0,238	0,025	1,037	0,457	9,52	-	-
6	0,048	0,044	0,4	0,35	0,15	1,142	0,916	2,333	-	-

Образ дефекта автотрансформатора АДЦТГ-120000/220 (см. рис. 2.2) полностью соответствует высокотемпературному перегреву, который и был зафиксирован в данном трансформаторе. Однако данный дефект сопровождался деструкцией твердой изоляции, о чем свидетельствует значение отношения CO₂/CO из табл. 3.

Причиной вывода из эксплуатации автотрансформатора 330 кВ (№3 в табл. 3), стал ползучий разряд. На, что указывают и результаты вскрытия и отношения пар газов из табл. 3. Однако, образ дефекта, приведенный на рис. 2.3 в большей степени соответствует дуговому разряду.

Рост концентраций газов в трансформаторе №4 (ТДН-16000/110/6), обусловлен разрядами высокой энергии из-за ослабление гайки на шпильке ввода обмотки НН. Построенный образ дефекта, (см. рис. 2.4) не соответствует не одному из эталонных образов рекомендуемых в [1, 4]. Однако отношения пар газов (табл. 3) четко указывают на разряды большой энергии.

Автотрансформатор АДЦТН-125000/220/110 (№5 в табл. 3) был поврежден из-за ползучего разряда по поверхности и в толщине главной изоляции. Отношения пар газов приведенные в табл. 3 соответствуют ползучему разряду. Однако образ дефекта, построенный по значениям концентраций газов, больше соответствует дуговому разряду.

Причиной вывода из эксплуатации трансформатора ОЦГ-135000/500 (№6 в табл. 3) стало разрушения поверхности правого поперечного бруса, клина, прижимной пластины, болта и прямоугольной замковой шайбы, в результате разрядов высокой энергии. Отношения пар газов, из таблицы 3,

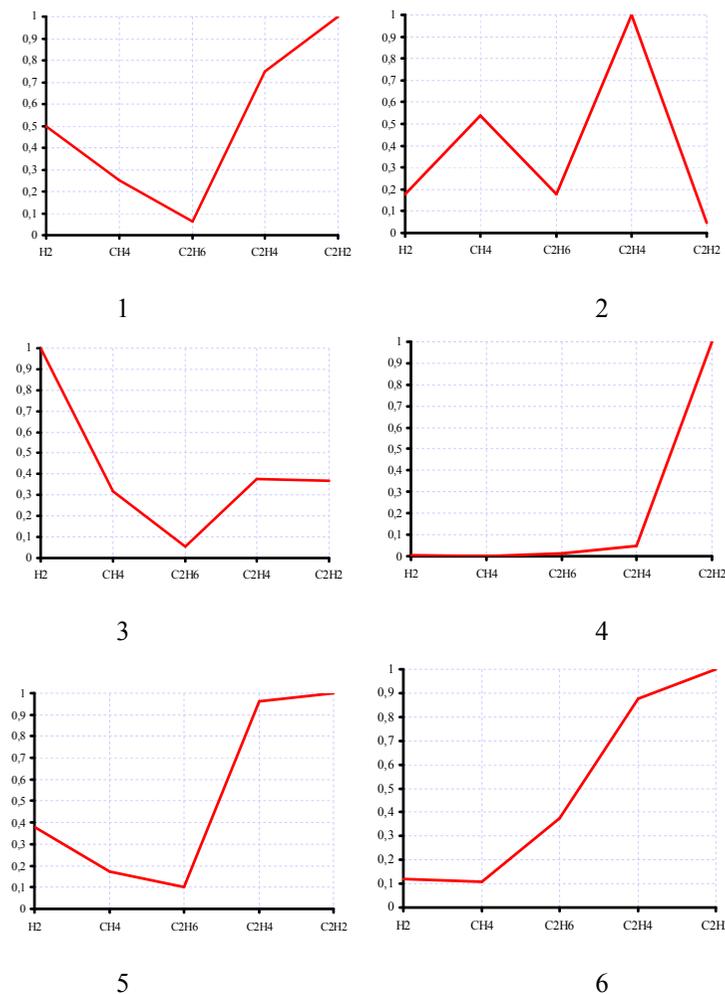


Рис. 2 – Графические образы дефектов для 6 трансформаторов, с нечеткими диагнозами, полученные при диагностике с помощью графических образов дефектов

однозначно определяют данный дефект. В тоже время, построенный образ дефекта (см. рис. 2.6) не соответствует не одному из эталонных образов, рекомендуемых в [1, 4].

Таким образом, выполненный анализ позволил установить, что с помощью графических образов дефектов невозможно распознавать деструкцию основной изоляции и разгерметизацию бака РПН. Также определенные сложности возникают с диагностированием тех электрических дефектов (кроме дугового разряда), для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен. Это обусловлено ограниченным числом эталонных образов приведенных в нормативных документах.

Кроме того, необходимо отметить, что все дефекты распознавание, которых по графическим образам оказалось затруднительным были распознаны по отношениям пар газов. В результате одновременного использования двух диагностических схем, были распознаны все 100% дефектов в анализируемой выборке.

Выводы.

1. Выполнен анализ достоверности распознавания типа дефектов в высоковольтных силовых трансформаторах с помощью отношений пар газов и графических образов дефектов. Установлено, что обе диагностические схемы обладают достаточно высокой достоверностью. Так при использовании отношений пар газов совпадение поставленного и реального диагнозов составило 96%, а при использовании графических образов дефектов – 94%. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований, приведенных в открытой печати;

2. Установлено, при использовании отношений пар газов, затруднения с постановкой диагноза возникают при распознавании комбинаций дефектов термического и электрического типов;

3. Выполненный анализ позволил установить, что с помощью графических образов дефектов не возможно распознавать деструкцию основной изоляции и разгерметизацию бака РПН. Также определенные сложности возникают с диагностированием тех электрических дефектов (кроме дугового разряда), для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен. Это обусловлено ограниченным числом эталонных образов приведенных в нормативных документах;

4. Сравнительный анализ показал, что дефекты, распознавание которых с помощью отношений пар газов вызвало затруднение, могут быть распознаны с помощью графических образов дефектов, и наоборот. Наибольшее значение достоверности при распознавании типа дефекта трансформатора, может быть получено при одновременном использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Список литературы: 1. Диагностика маслонеповненного трансформаторного обладания за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007.; 2. *Алексеев Б.А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / *Б. А. Алексеев* – М. НЦ ЭНАС, 2002 г. – 216 с.; 3. *Львов М.Ю.* Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования / *М.Ю. Львов* // Электрические станции. – 2002. – №12. – С. 44 – 51; 4. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. – Офф. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001. – (Отраслевой руководящий документ действует с 01.01.2001).

Поступило в редколлегию 12.12.2012

УДК 621.31

Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов / Шугенко О. В., Баклай Д. М., Острикова Т. А., Мельник Н. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - №.17 (990). – С.178-187. Бібліогр.:4. Іл.:2. Табл.:3.

Виконано оцінку достовірності розпізнавання типів дефектів трансформаторів при використанні відносин пар газів і графічних образів дефектів. Встановлено, що найбільше значення достовірності при розпізнаванні типу дефекту трансформатора, може бути отримано при одночасному використанні відносин пар газів і графічних образів дефектів.

Ключові слова: образ дефектів, відносини пар газів, часткові розряди.

The evaluation of the reliability of detection of defects types of transformers using relations gas and graphic images of defects. Found that the maximum reliability in recognizing defect type transformer can be obtained while using the relationship pairs of gases and graphic images of defects.

Keywords: image of defects, relationship pairs of gases, partial discharges.

В. Б. ЮФЕРОВ, д-р. техн. наук, нач. отд ННЦ ХФТИ, Харьков;
А. Н. ОЗЕРОВ, мнс, ННЦ «ХФТИ», Харьков;
Д. В. ВИННИКОВ, мнс, ННЦ «ХФТИ», Харьков;
И. В. БУРАВИЛОВ, мнс, ННЦ «ХФТИ», Харьков;
А. Н. ПОНОМАРЕВ, мнс, ННЦ «ХФТИ», Харьков

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СРЕДЕ ЖИДКОГО АЗОТА

Исследована возможность измельчения эластичных материалов импульсными высоковольтными электрическими разрядами в среде жидкого азота. В качестве материала для измельчения использовалась резина изношенных автомобильных покрышек. Определено влияние некоторых параметров электрогидроимпульсной системы на получение порошка резины размером менее 2 мм. Оценены основные энергетические затраты на измельчение эластичных материалов данным способом.

Ключевые слова: Электрический разряд, высоковольтный разряд, эластичный материал, резина, жидкий азот, измельчение.

Введение. Проблема утилизации и переработки изношенных шин имеет существенное экономическое значение, поскольку потребности в природных ресурсах непрерывно растут, а их стоимость постоянно повышается. В связи с тем, что на 80% составляющей шин является нефть, их промышленная утилизация даст возможность сохранить нефтяные невозполнимые природные ресурсы, стимулировать развитие ресурсосберегающих технологий.

Кроме того, вышедшие из эксплуатации изношенные шины не подвергаются биологическому разложению, поэтому они являются источником длительного загрязнения окружающей среды. В результате химического, термического и радиационного разрушения резины в атмосферу и грунтовые воды могут попадать различные токсичные и канцерогенные продукты, которые оказывают крайне негативное воздействие на организм человека. Происходит загрязнение не только атмосферы, но и водных бассейнов, почв. Вместе с тем, изношенные автомобильные шины содержат в себе ценное сырье: каучук, металл, текстильный корд.

Полученная в ходе переработки резиновая крошка – незаменимый материал при производстве дорожных отбойников, напольных покрытий для промышленных зданий, сельскохозяйственных построек, спортивных и игровых комплексов. Добавленная в асфальт крошка повышает его износостойкость в несколько раз.

© В. Б. Юферов, А. Н. Озеров, Д. В. Винников, И. В. Буравилов, А. Н. Пономарев, 2013

Поэтому необходимы энергосберегающие и экологически безопасные технологии [1, 2] по переработки резинотехнических изделий в крошку.

В настоящее время находит применение электрогидроимпульсная технология измельчения материалов. При пробое жидкости, по схеме, показанной на рис. 1, вокруг канала разряда возникает зона высокого давления, диаметр которой пропорционален мощности импульса. Жидкость, получив ускорение от расширяющегося с большой скоростью канала разряда, перемещается от него во все стороны, образуя на том месте, где был разряд, значительную по объему полость, названную кавитационной, и вызывая первый гидравлический удар. Затем полость также с большой скоростью смыкается, создавая второй кавитационный гидравлический удар [3].

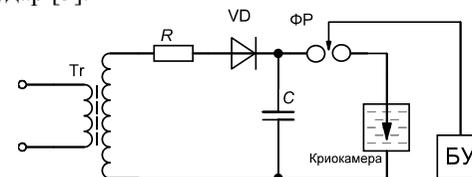


Рис. 1 – Электрическая схема для реализации электрогидроимпульсного удара: ФП – формирующий искровой промежуток, РП – рабочий искровой промежуток в жидкости

Дробление резины электрогидроимпульсным способом в обычной воде не происходит [1] в виду ее пластичности. Поэтому для придания хрупкости резине, в качестве жидкости в данной технологии использовался жидкий азот.

Результаты исследований. Дробление эластичных материалов при низкой температуре происходило в разрядной теплоизолированной камере объемом 2,1 литра, изображенной на рис. 2. На оси камеры расположен электрод 1, вторым электродом является дно камеры. В случае понижения давления над поверхностью жидкости к патрубку 5 присоединялся водокольцевой вакуумный насос. В камеру помещалась резина размером 10-25 мм. Свободное пространство камеры заполнялось на 2/3 жидким азотом. После чего производился разряд конденсатора на рабочий промежуток в жидкости.

Осциллограмма тока проходящего через рабочий зазор представлена на рис. 3. Ток имеет затухающий колебательный характер с амплитудой 16 кА, периодом 15 мкс. Параметры электрической цепи следующие: пробивное напряжение 24 кВ, запасаемая энергия конденсаторной батареи 576 Дж, индуктивность разрядной цепи 2,9 мкГн, сопротивление разрядной цепи 0,1-0,2 Ом.

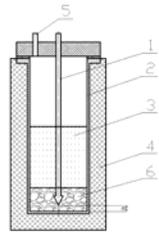


Рис. 2 – Конструкция разрядной камеры для электрогидроимпульсного измельчения в жидком азоте: 1 - электрод, 2 - камера, 3 - жидкий азот, 4 - теплоизоляция, 5 - выходной патрубок, 6 - резина.

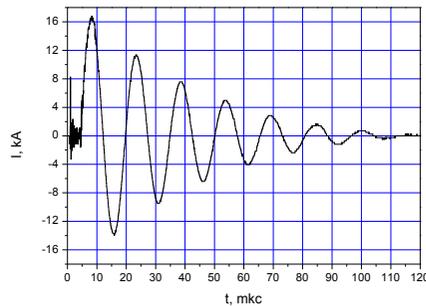


Рис. 3 – Оциллограмма импульса тока через разрядный промежуток в жидком азоте

На рис. 4 представлено фото резиновой крошки после электрогидроимпульсного дробления в жидком азоте. Размеры резиновой крошки находились в пределах от единиц микрон, до 2 мм.

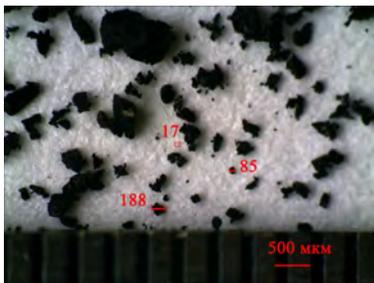


Рис.4 – Фотография с USB микроскопа резиновой крошки после обработки

На рис. 5 представлена зависимость выхода продукта от количества импульсов при различном межэлектродном расстоянии от 5 до 23 мм.

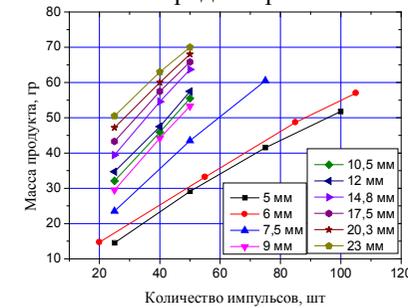


Рис. 5 – Зависимость выхода продукта от количества импульсов, при различном межэлектродном расстоянии

Количество обрабатываемой резины 100 гр. Из результатов видно, что увеличение межэлектродного расстояния с 5 до 23 мм, приводит к росту выхода измельченной до 2 мм резиновой крошки в 3.5 раза. Максимальный выход измельченного материала наблюдался при межэлектродном расстоянии 23 мм и составил 51,2 г, после 25 импульсов.

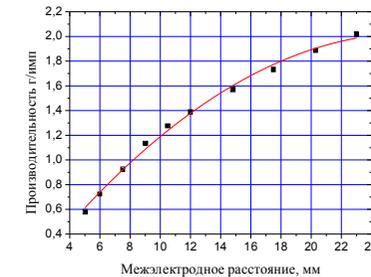


Рис.6 – Зависимость производительности резиновой крошки от межэлектродного расстояния

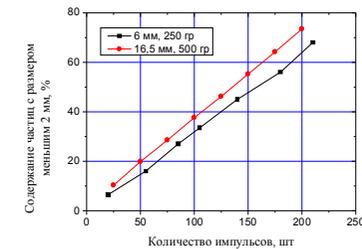


Рис. 7 – Зависимость содержания частиц с размером меньше 2 мм в процентах от количества импульсов

На рис. 6 представлена зависимость производительности резиновой крошки от межэлектродного расстояния. На межэлектродном расстоянии от 5 до 23 мм наблюдается положительная производная роста производительности. Максимальная производительность получена на межэлектродном расстоянии 23 мм, и составила 2,05 г/имп.

На рис. 7 показан график зависимости содержания частиц с размером меньше 2 мм в процентах от количества импульсов. Межэлектродное расстояние в данном случае составило 6 и 16,5 мм, при загрузке резины 250 и 500 г соответственно. В обоих случаях наблюдался линейный характер роста содержания частиц с размером меньше 2 мм. При обработке 210 импульсами измельчается порядка 70% крошки до необходимого размера.

На рис. 8 представлена диаграмма распределения резиновой крошки по фракциям после 25, 50, 75 и 100 импульсов. Обработывалось 500 гр резины, при межэлектродном расстоянии 16.5 мм. Из диаграммы видно, что после каждой серии импульсов наблюдается постепенное увеличение количества материала более мелких фракций. После 100 импульсов количество резиновой крошки с размером менее 2 мм составляет 35%.

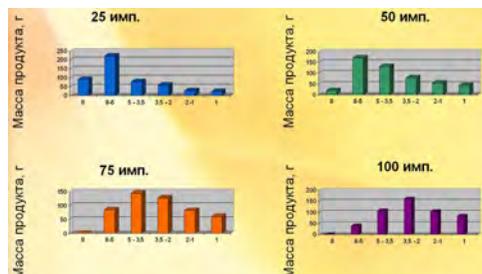


Рис. 8 – Диаграмма распределения резиновой крошки по фракциям после 25, 50, 75 и 100 импульсов

В результате проведенных исследований электрогидроимпульсного измельчения эластичных материалов в среде жидкого азота спроектирована технологическая линия и определены ее основные технико-экономические показатели, которые представлены в таблице 1.

Таблица – Технико-экономические показатели

Производительность, кг/час	50
Удельная производительность, г/имп	2,1
Размер резиновой крошки, мм	0,2-2
Расход жидкого азота, л/кг	2,8
Энергозатраты электрогидроимпульс, кВт·час	6
Частота следования электрических разрядов, Гц	7

Из литературных данных известно, что на производство 1 кг жидкого азота требуется затратить 0,44 кВт·час[4].

Выводы. Разработана технологическая схема измельчения эластичных материалов электрогидроимпульсным воздействием в среде жидкого азота. Определено влияние некоторых параметров электрогидроимпульсной системы на получение порошка резины размером менее 2 мм. Максимальная производительность получена на межэлектродном промежутке 23 мм и составила 2,1 г/имп. Оценены основные энергетические затраты на измельчение эластичных материалов данным способом.

Список литературы: 1. Курец В. И. Электроимпульсное разрушение охлажденных полимеров (высших α-олефинов) / В.И. Курец, Г.В. Несын, Г.П. Филатов, А.Ю. Юшков, К.Б. Коновалов // Известия Томского политехнического университета. – 2009.–Т.314, №4. – С.103–106. 2. Виноградов Б. В. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом / Б.В. Виноградов, Д.А. Федин, В.И. Емельяненко, И.А. Осташко // Вопросы химии и химической технологии. – 2008. – №6. – С. 163–166. 3. Юткин Л.А., Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 252 с. 4. Кудряцев И. Н. Эффективность использования пневмодвигателя в автомобиле // И.Н. Кудряцев, А.И. Пятак, С.И. Бондаренко, А.Я. Левин, Б.Н. Мурынец-Маркевич, М.Ч. Пламмер // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – №2(22), С. 82–88.

Надійшла до редколегії 05.11.2012

УДК 621.746.044.4.001.57

Электроимпульсное измельчение эластичных материалов в среде жидкого азота / В. Б. Юферов, А. Н. Озеров, Д. В. Винников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - №.17 (990). – С.188-194. Бібліогр.:4. Іл.:8. Табл.:1.

Досліджена можливість подрібнення еластичних матеріалів імпульсними високовольними електричними розрядами в середовищі рідкого азоту. Як матеріал для подрібнення використовувалася гума зношених автомобільних покришок. Визначений вплив деяких параметрів електрогідроімпульсної системи на здобуття порошку гуми розміром менше 2 мм. Оцінені основні енергетичні витрати на подрібнення еластичних матеріалів даним способом.

Ключові слова: електричний розряд, високовольний розряд, еластичний матеріал, гума, рідкий азот, подрібнення.

Elastic materials crushing possibility by pulsed high- voltage electrical discharges in the liquid nitrogen medium has been investigated. Life-expired automobile tires rubber have been used as a material for crushing. Electrohydropulsed system parameters that are affected on rubber powder of less than 2 mm size obtainment have been determined. The basic energy expenses for crushing of elastic materials by proposed method have been estimated.

Keywords: electrical discharge, high-voltage discharge, elastic material, rubber, liquid nitrogen, attrition

ЗМІСТ

АРТЮХ С.Ф., ЛЮБИМОВА Н.А. Идентификация источника загрязнения речной воды в зоне каскада малых ГЭС.....	3
БУДАНОВ П.Ф., ЧЕРНЮК А.М. Экспериментальное определение электрофизических параметров поверхностных электролитических заземлителей передвижных электроустановок.....	8
БАЖЕНОВ В.Н. Анализ работы релейной защиты и автоматики для послеаварийного восстановления схемы электроснабжения.....	18
БУРБЕЛО М.Й., МЕЛЬНИЧУК С.М. Удосконалення захистів розподільних мереж з об'єктами малої енергетики (сонячними електростанціями).....	26
ВЛАДИМИРОВ Ю.В., МАЛЫШЕВА Д.О. О проекте новой редакции «методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами».....	32
ГОЛИК О. В. , ВЫЛЕЖАНИНА Б. С. , ВЕДМИДЬ А. Г. Риски при принятии технологических решений в процессе производства кабельно-проводниковой продукции.....	40
ГРИБ О.Г., ЖДАНОВ Р.В., ГАПОН Д.А., ЗУЕВ А.А. Измерение частоты промышленной сети как показателя качества электрической энергии.....	45
ГУРИН А.Г., ЩЕБЕНЮК Л.А. , ГОЛИК О. В. , АНТОНЕЦЬ С.Ю. Дослідження впливу пластичності мідного провідника на напругу пробою ізоляції емальпроводу.....	51
ГУРИН А.Г., БОНДАРЕНКО О.В. , ШВИДКИЙ О. Метод оцінки механічного зношування та ресурсу кабельних ліній геофізичного пересувного обладнання.....	58
ДИКАНЬ А.А., ВЛАДИМИРОВ Ю.В. Автоматическое управление компенсацией реактивной мощности.....	66
ЗОЛОТАРЕВ В.М., ЧУЛЕЕВ В.Л., ЧУЛЕЕВА В.Л. Определение структурно-чувствительного показателя и константы скорости старения полимерных композиций на основе поливинилхлорида для изоляции кабельно-проводниковой продукции.....	69
КАРШЕНОВ Д.П. Уточнение математической модели m-пульсных регулируемых выпрямителей со смешаной RLC-нагрузкой в цепи постоянного тока.....	78
КИМ ЕН ДАР Методика расчета токопровода высоковольтных полимерных проходных изоляторов.....	85

КИМ ЕН ДАР, НАЗАРЕНКО А.В., КИРЮК Д.Г. Исследование электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией.....	93
ТОПОРОВА Ю.В., ЛАЗУРЕНКО А.П. Сравнительная характеристика методов определения реактивной мощности.....	100
МИРОШНИК О.О. Рівномірний розподіл навантажень в мережі 0,38/0,22 кв з використанням нейронної мережі.....	107
РУДЕВИЧ Н.В., ПІСКУРЬОВ М.Ф. Математична модель синхронного генератора в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів в середовищі Matlab.....	115
СЕНДЕРОВИЧ Г.А., ЩЕРБАКОВА П.Г. Влияние погрешности сопротивления связи с системой на определение долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений.....	120
СИРОТИН Ю.А. Энергетические режимы трехфазной трехпроводной цепи.....	129
МЕГЕЛЬ Ю.Е., РУДЕНКО А.П., РЫБАЛКА А.И., ДАНИЛКО И.В. Метод математического программирования для принятия решения при модернизации электросетей.....	144
ТКАЧЕНКО А.А., ОСИЧЕВ А.В. Снижение токовых и динамических нагрузок в регулируемом асинхронном электроприводе шахтного скребкового конвейера при заклинивании цепи.....	157
ЧЕРКАШИНА В.В. Врахування параметрів навколишнього середовища в задачах проектування повітряних ліній.....	163
ЩЕБЕНЮК Л.А., АНТОНЕЦЬ Т.Ю. Кінетика нагрівання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією.....	167
ЩЕРБИНА С.А. Особливості радіаційного модифікування фторвмісних полімерів.....	172
ШУТЕНКО О. В., БАКЛАЙ Д. Н., ОСТРИКОВА Т.А., МЕЛЬНИК Н.Ю. Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.....	180
ЮФЕРОВ В.Б., ОЗЕРОВ А.Н., ВИННИКОВ Д.В., БУРАВИЛОВ И.В., ПОНОМАРЕВ А.Н. Электроимпульсное измельчение эластичных материалов в среде жидкого азота.....	190

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 17 (990)

Науковий редактор д-р техн. наук, проф. А. Г. Гурин,
Технічний редактор канд. техн. наук, доц. Н. В. Рудевіч

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра ЕІКТ.
Тел.: тел. (0572) 7076380; e-mail: transformer3@ Rambler.ru

Обл.-вид № 53–13.

Підп. до друку 13.05.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта
видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21
