

Секция «Электроэнергетика и электротехника»

Председатель секции: к.т.н., доц. Мурзин А.Ю.

Зам. председателя: к.т.н., доц. Аржанникова А.Е.

И.Ю. Иванов, асп. (КНИТУ им. А.Н. Туполева)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ЛИНИИ В СИСТЕМЕ MATLAB**

В результате развития компьютерных технологий появилась возможность виртуального испытания органов релейной защиты (РЗ) в системе реального времени. Современные средства автоматического проектирования позволяют визуализировать процесс работы. Это дает возможность следить за входными и выходными данными системы РЗ, а также за промежуточными расчетами.

В данной работе была создана модель дифференциальной защиты линии (ДЗЛ).

При моделировании была задействована программно-математическая среда виртуального проектирования систем реального времени MATLAB, которая является одной из наиболее удобных при реализации подобных моделей.

Для проверки работы ДЗЛ была спроектирована первичная цепь, которая представляет электроэнергетическую систему (ЭЭС), состоящую из источников питания C_1, C_2 ; нагрузки, подключённой через понижающие трансформаторы T_1, T_2 ; выключателей B_1, B_2 ; линии электропередачи L , трансформаторов тока $ТТ_1, ТТ_2$. Вид моделируемой ЭЭС представлен на рис. 1.

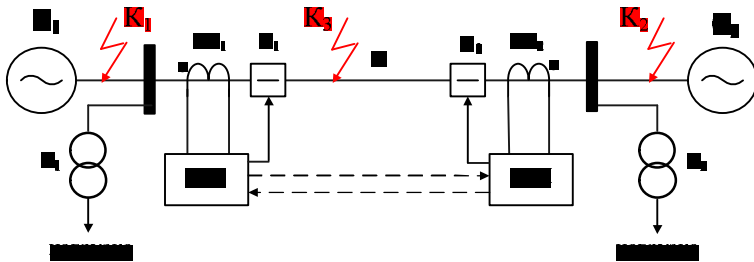


Рис. 1. Однолинейная схема модели участка ЭЭС

Для перехода от первичных цепей к системе РЗ в данной модели предусмотрены электромагнитные трансформаторы тока (ТТ), установленные в каждой фазе линии электропередачи (ЛЭП), которые представляют собой отдельные подсистемы [1].

Моделирование работы ДЗЛ производится путём вычисления дифференциального и тормозного токов в каждой фазе на основе замеренных векторов тока по концам защищаемой ЛЭП. При этом условие срабатывания ДЗЛ задаётся аналитически следующими соотношениями:

$$I_{\text{диф}} > I_{\text{д.уст}},$$

$$I_{\text{д.уст}} = I_{\text{д.0}} + k_{\text{ТОРМ}} \cdot I_{\text{ТОРМ}},$$

где $I_{\text{диф}}$ – мгновенное значение дифференциального тока; $I_{\text{д.уст}}$ – уставка срабатывания ДЗЛ; $I_{\text{д.0}}$ – начальный порог срабатывания ДЗЛ; $k_{\text{ТОРМ}}$ – коэффициент торможения; $I_{\text{ТОРМ}}$ – мгновенное значение тока торможения.

Модель позволяет исследовать поведение ДЗЛ в следующих режимах:

- внутреннее КЗ (K_3);
- внешнее КЗ (K_1 и K_2);
- КЗ, сопровождающиеся насыщением ТТ.

Последний режим представляет особый интерес, так как погрешности ТТ в переходных режимах короткого замыкания (КЗ) оказывают большое влияние на работу ДЗЛ ввиду возникновения опасности неселективного срабатывания защиты при КЗ вне зоны действия [2]. Физическая причина неудовлетворительных характеристик ДЗЛ во время переходных режимов КЗ заключается в непригодности защиты к работе в условиях резкого уменьшения вторичного тока плеча, в котором произошло насыщение ТТ. Это может привести к излишнему увеличению дифференциального тока и неселективной работе ДЗЛ при внешнем КЗ.

Важной функцией математической модели является возможность осциллографирования аналоговых и дискретных сигналов в различных режимах работы защищаемого объекта.

На рис. 2, а представлены осциллограммы токов плеч фазы А ДЗЛ, а также сигналы $I_{\text{диф}}$ и $I_{\text{д.уст}}$ при внешнем однофазном КЗ K_2 (замыкание фазы А на землю), сопровождающимся насыщением трансформатора тока ТТ₁.

По рис. 2,б можно проанализировать дискретные сигналы, заведённые на входа виртуального регистратора аварийных событий (РАС) при данном повреждении. Так видно, что замыкание фазы А на землю возникает в момент времени 1,0 с, что приводит к появлению дискретных сигналов «зона срабатывания ДЗЛ», «выходные реле ДЗЛ» (через 15 мс).

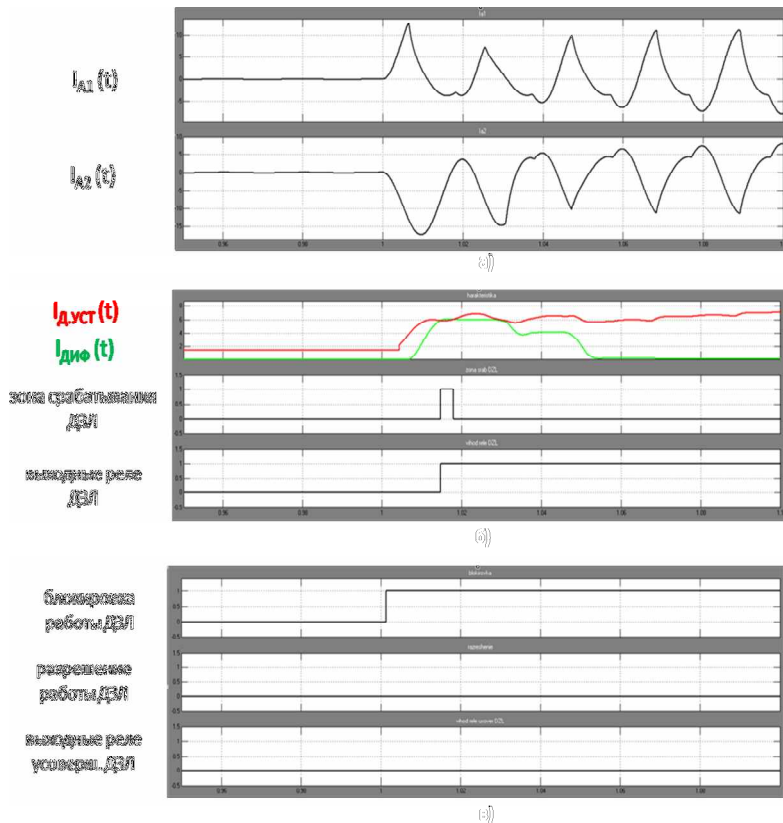


Рис. 2. Осциллограммы, записанные виртуальным РАС при внешнем КЗ⁽¹⁾: а) мгновенные значения токов плеч ф. А ДЗЛ; б) дискретные сигналы для анализа работы традиционной ДЗЛ; в) дискретные сигналы для анализа работы усовершенствованной ДЗЛ

Следовательно, при внешнем КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ одного из плеч, возможна излишняя работа ДЗЛ. Это является недостатком данной защиты.

Для того чтобы обеспечить селективность действия ДЗЛ в режиме насыщения ТТ, современные производители микропроцессорных устройств РЗ предлагают следующее [3]:

1) применение повышенных коэффициентов торможения или различных видов торможения;

2) увеличение выдержки времени ДЗЛ.

Однако при использовании данных мер теряются чувствительность и быстродействие данной защиты.

Для устранения указанного недостатка в данной работе в алгоритме функционирования ДЗЛ используются вспомогательные признаки переходных процессов, свойственные режимам внутреннего или внешнего КЗ, в дополнение к традиционному принципу действия, основанному на вычислении дифференциального и тормозного токов.

На основе вспомогательных признаков, в алгоритме работы ДЗЛ реализованы:

- разрешающий блок (РБ), используемый для разрешения работы ДЗЛ при выявлении КЗ в зоне действия защиты;

- запрещающий блок (ЗБ), используемый для блокирования работы ДЗЛ при выявлении КЗ вне зоны действия защиты.

На рис. 2, в показаны добавленные в виртуальный РАС дискретные сигналы «разрешение работы ДЗЛ», «блокировка работы ДЗЛ», получаемые с соответствующих выходов блоков РБ и ЗБ.

Благодаря применению быстродействующего пускового органа, запускающего работу РБ и ЗБ, внешнее КЗ удаётся определить до появления сигнала «зона срабатывания ДЗЛ». Тем самым, удаётся предотвратить неселективную работу ДЗЛ при внешнем КЗ (сигнал «выходные реле усовершенствованной ДЗЛ» отсутствует), не загроуляя защиту и не увеличивая выдержку времени.

Разработанная модель позволяет исследовать работу ДЗЛ при различных режимах защищаемого объекта.

С помощью модели можно программно:

- сформировать дифференциальные и тормозные токи ДЗЛ;

- задать характеристику срабатывания ДЗЛ;

- реализовать выходные цепи отключения и сигнализации;

- визуализировать динамику работы ДЗЛ при КЗ в зоне и вне зоны действия защиты.

Дополнительные блоки РБ и ЗБ обеспечивают правильную работу ДЗЛ при внешних и внутренних КЗ, при этом сохраняя чувствительность и быстродействие защиты.

Многочисленные испытания разработанной ДЗЛ в различных режимах позволяют судить о корректности алгоритма работы защиты.

Библиографический список

1. Ершов Ю.А., Бойко, А.С., Михайленко, Я.В. Цифровые цепи тока и напряжения. Применение в релейной защите. / Новости Электротехники. 2006. – № 6. – с. 11-14.
2. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – М.: Знак, 2008. – 273 с.
3. **Рекомендации** по выбору уставок продольной дифференциальной защиты линии электропередачи типа ШЭ2607 091- 93. 2008. НПП «ЭКРА». – 16 с.

А.А. Жегалов, асп., В.Г. Гарке, д.т.н., проф. (КНИТУ-КАИ)

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НА БАЗЕ МП РЗАУ

Современные терминалы микропроцессорной релейной защиты (МП РЗАУ) осуществляют функции защит, а также функции автоматики и управления высоковольтным выключателем (ВВ). При этом функции мониторинга и диагностики выключателя в той или иной степени уже присутствуют в устройствах мировых производителей релейной защиты. Однако их реализация не всегда полноценна и, зачастую, сводится к ведению статистики выключателя. В связи с этим задача разработки новых, а также усовершенствования существующих принципов оценки технического состояния высоковольтного выключателя является весьма актуальной.

Рассмотрим предлагаемый принцип организации работы функции мониторинга и диагностики высоковольтного выключателя (МДВВ) (рис. 1), а также способ оценки технического состояния выключателя по энергии коммутации.

Функция МДВВ включена в набор функции терминала РЗАУ. Работа функции осуществляется после окончания коммутационного процесса. Все расчеты производятся раздельно для каждой фазы.

Вычислительная схема функции МДВВ оперирует набором величин, участвующих в расчетах. По способу поступления в схему функции МДВВ эти величины подразделяются на следующие категории:

1. Автоматически поступающие – параметры отключения;
2. Задаваемые вручную – уставки функции.

Как известно, наибольшая сработка коммутационного ресурса выключателя происходит при коммутациях токов КЗ, сопровождающихся дугой, в результате оплавления и испарения материала контактов.

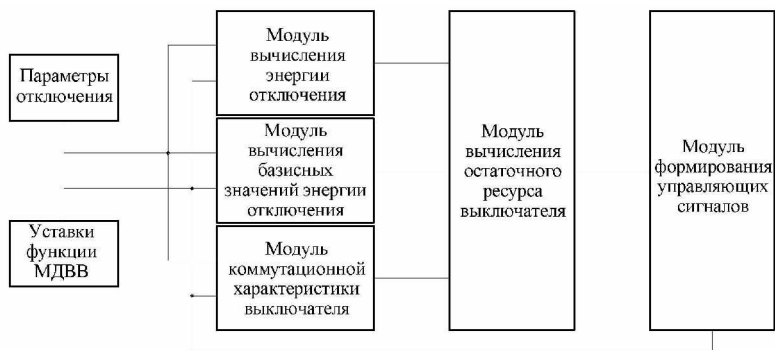


Рис. 1. Блок-схема работы функции мониторинга и диагностики высоковольтного выключателя

При больших коммутируемых токах и сравнительно редких операциях общий износ выключателя находится в зависимости от числа коммутаций и от энергии, выделяющейся на его контактах [1].

Величины, относящиеся к параметрам отключения, получим, определив выражение для суммарной энергии отключения выключателя (W_{Σ}) [2].

$$W_{\Sigma} = W_1 + W_2, \quad (1)$$

где W_1 – энергия, выделившаяся на контактах выключателя в интервале времени t_0-t_1 (рис. 2); W_2 – энергия, выделившаяся в выключателе в интервале времени t_1-t_2 .

Рассмотрим оба слагаемых выражения (1) по отдельности:

$$W_1 = \int_{t_0}^{t_1} (i_{\text{пер.}} + i_{\text{апер.}})^2 \cdot R_{\text{к}} dt, \quad (2)$$

где $i_{\text{пер.}}$ – периодическая составляющая тока КЗ; $i_{\text{апер.}}$ – аperiodическая составляющая тока КЗ; $R_{\text{к}}$ – сопротивление контактов.

$$W_2 = \int_{t_1}^{t_2} e \cdot (i_{\text{пер.}} + i_{\text{апер.}}) \cdot \sin(\varphi_{\text{КЗ}}) dt, \quad (3)$$

где e – ЭДС системы; $\varphi_{\text{КЗ}}$ – угол короткого замыкания в начальный момент времени.

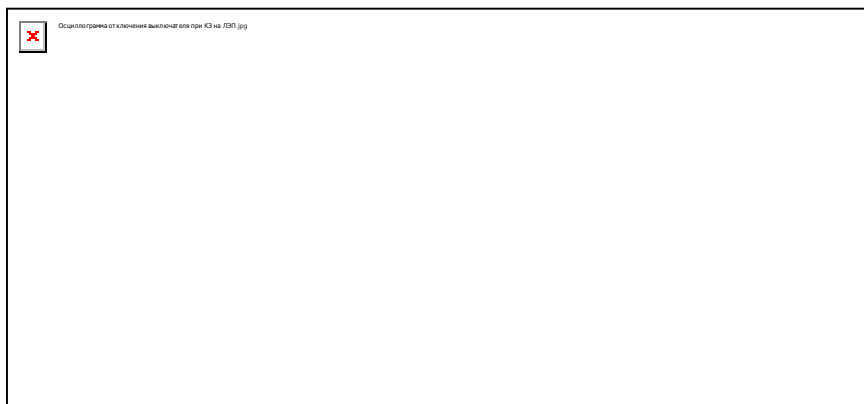


Рис. 2. Осциллограмма отключения выключателя при КЗ на ЛЭП:
 U_{Φ} , I_{Φ} – фазные значения напряжения и тока; t_0 – время возникновения КЗ; t_1 – время начала размыкания контактов; t_2 – время погасания дуги

С учетом (2) и (3), а также преобразований, выражение (1) примет вид

$$\begin{aligned}
 W_{\Sigma} = & R_{\kappa} \int_{t_0}^{t_1} i_{\text{пер.}}^2 dt + 2R_{\kappa} \int_{t_0}^{t_1} i_{\text{пер.}} \cdot i_{\text{апер.}} dt + R_{\kappa} \int_{t_0}^{t_1} i_{\text{апер.}}^2 dt + \\
 & + \int_{t_1}^{t_2} e \cdot i_{\text{пер.}} \cdot \sin(\varphi_{\text{КЗ}}) dt + \int_{t_1}^{t_2} e \cdot i_{\text{апер.}} \cdot \sin(\varphi_{\text{КЗ}}) dt.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Значения параметров времени t_0 , t_1 , t_2 выражения (4) фиксируются таймером (рис. 3), и после завершения коммутационного процесса передаются в функцию МДВВ.

Для расчета значений $\varphi_{\text{КЗ}}$, T_a , $i_{\text{пер.}}$, $i_{\text{апер.}}$, также входящих в состав выражения (4), необходимыми параметрами отключения являются R , X , $I_{\text{КЗ}}$. Эти параметры вычисляются в результате автоматического анализа осциллограмм и программным образом поступают в функцию МДВВ (рис. 3).

Расчет значений $\varphi_{\text{КЗ}}$ и T_a производится, соответственно, по выражениям (5) и (6):

$$\varphi_{\text{КЗ}} = \text{tg} \frac{X}{R}; \tag{5}$$

$$T_a = \frac{X}{\omega \cdot R}. \tag{6}$$

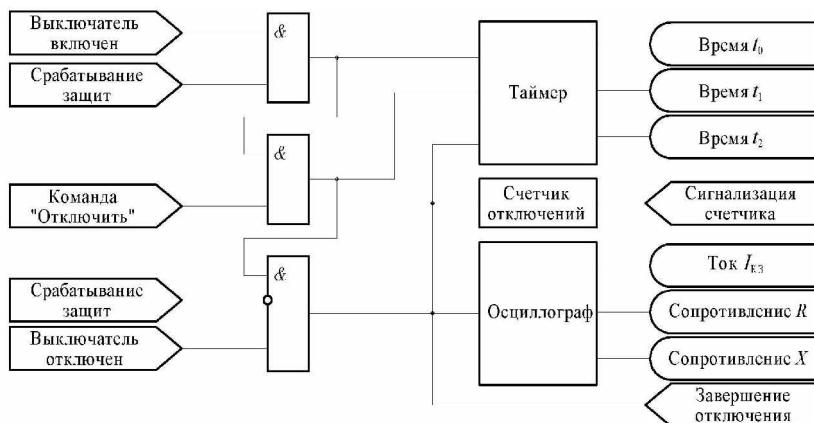


Рис. 3. Функциональная схема получения параметров отключения

Расчет значений $i_{пер.}$, $i_{апер.}$ производится, соответственно, по выражениям (7) и (8):

$$i_{пер.} = I_{K3} \cdot \sin(\omega \cdot t - \Phi_{K3}); \quad (7)$$

$$i_{апер.} = -i_{пер.}(t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{T_a}}. \quad (8)$$

Таким образом, параметрами отключения функции МДВВ являются величины R , X , I_{K3} , t_1 , t_2 , t_0 .

Уставки функции МДВВ включают в себя табличные заводские характеристики, относящиеся к данному типу выключателя. Они вносятся при наладке и могут быть изменены вместе с остальными уставками терминала.

К уставкам функции МДВВ относятся величины, необходимые для:

- задания коммутационной характеристики выключателя;
- вычисления энергии отключения;
- вычисления базисных значений энергии отключения;
- формирования управляющих сигналов.

Сработанный коммутационный ресурс выключателя по операциям отключения

$$R_{O.сраб.} = \sum_1^i \frac{W_{O.расч.}(I_{O.i})}{W_{O.б.}(I_{O.i})} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $W_{O,расч.}(I_{O,i})$ – расчетное значение энергии отключения при данном токе (эквивалентно W_{Σ} для конкретной коммутации); $W_{O,б.}(I_{O,i})$ – базисная суммарная энергия отключения.

Остаточный коммутационный ресурс выключателя

$$R_{ост.} = R_o - R_{O,сраб.}, \quad (10)$$

где R_o – начальное значение ресурса выключателя. В случае нового выключателя $R_o = 100\%$.

Условие вывода выключателя в ремонт имеет вид

$$R_{ост.} < R_{доп.}, \quad (11)$$

где $R_{доп.}$ – допустимый остаточный коммутационный ресурс выключателя на одну коммутацию при номинальном токе отключения выключателя.

$$R_{доп.} = \frac{1}{N_{O.}(I_{O,ном.})} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где $N_{O.}(I_{O,ном.})$ – допустимое количество отключений при номинальном токе отключения (паспортные данные выключателя).

В данной методике учитываются режимы коммутации, характеризуемые:

1. Величиной тока отключения;
2. Длительностью процесса коммутации;
3. Величиной напряжения в месте установки выключателя.

Библиографический список

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
2. Жегалов А.А., Гарке В.Г. Способ мониторинга и диагностики высоковольтных выключателей в автоматическом режиме / Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 2. – с. 26-29.

*Антони Дмовски, проф., В.С. Азалаков, техн. директор
(ООО «АПС Энергия РУС»)*

ФАТ – ГАРАНТИРОВАННОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ПЛАВНЫЙ ПУСК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1. Построение систем гарантированного электроснабжения

В промышленных системах существует категория потребителей, которые требуют непрерывного и качественного электроснабжения незави-

симо от присутствия и качества напряжения в электрической сети. Для этого применяются системы, построенные на основе электронных преобразователей напряжения и аккумуляторной батареи, обозначаемые UPS (Uninterruptible Power System). Стандартный UPS, выполненный по технологии «On-line» (рис. 1), обеспечивает бесперебойное питание потребителей переменным напряжением стабильной амплитуды и частоты, не зависящим от качества напряжения в электрической сети.

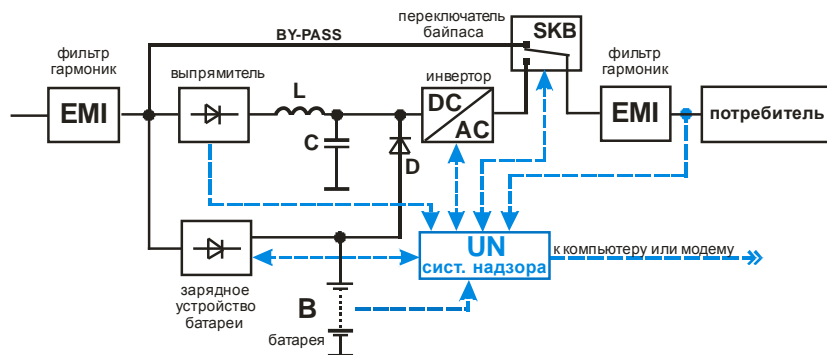


Рис. 1. Блок-схема стандартного UPS

Стандартные UPS применяют для питания большинства потребителей, таких как: компьютерные системы, аварийные источники освещения, устройства телекоммуникации, контроллеры КИПиА, контроллеры АСУ ТП и т.д. Однако существуют категории потребителей, требующих индивидуального подхода в решении вопроса гарантированного электроснабжения. Стандартные UPS допускают кратковременную перегрузку на выходе максимум до трех номинальных значений выходного тока. В частности, для запуска асинхронных двигателей, подключенных в качестве потребителей, такой перегрузочной способности стандартного UPS недостаточно, т.к. пусковые токи двигателей могут шестикратно превышать номинальный ток. Дополнительный фактор, что ток питания двигателя, получаемый от перегруженного UPS, не обладает синусоидальной формой, что может привести к нарушениям во время запуска, а также к полному отсутствию запуска. Проблему можно решить увеличением номинальной мощности UPS, но это приводит к удорожанию всей системы. Фирма APS Energia предлагает техническое решение для данной категории потребителей.

2. FAT – система гарантированного электроснабжения асинхронных электродвигателей

В промышленных системах различных отраслей в качестве одной из составляющих применяются приводные системы, которые должны бесперебойно вращаться электродвигателями, либо необходим старт двигателя в момент исчезновения напряжения в электрической сети. В качестве примера подобных приводных систем можно рассматривать:

- маслonaсосы смазки подшипников турбогенераторов;
- механизмы турбогенераторов, поддерживающие вращения ротора после прекращения подачи пара в турбину;
- вентиляторы подачи выхлопных газов к дымоходам;
- мазутные насосы;
- циркуляционные насосы, водяные насосы, пополняющие котлы и т.п.

Одним из вариантов решения проблемы гарантированного электроснабжения вышеупомянутых приводных систем является использование двигателей постоянного тока с электронными регуляторами и резервным питанием от аккумуляторных батарей. К сожалению, существующие недостатки двигателей постоянного тока исключают повсеместное применение этих систем. К этим недостаткам относятся:

- большие габариты, а также стоимость двигателя постоянного тока по отношению к асинхронному двигателю;
- ограниченный срок службы из-за износа коллектора и потребность в обслуживании;
- искрение коллектора.

Последний недостаток особенно нужно брать во внимание, когда двигатель используется в приводе масляных насосов или работает вблизи или внутри взрывоопасных производственных зон.

Этих недостатков лишена система, построенная на основе асинхронного двигателя и системы FAT, схема которой изображена на рис. 2.

В нормальном состоянии двигатель запитан от электрической сети через выпрямитель и преобразователь DC/AC. При исчезновении напряжения в электрической сети двигатель, через этот же преобразователь, бесперебойно переходит на питание от аккумуляторной батареи. Кроме того, при включении FAT обеспечивает плавный пуск двигателя за счет автоматического регулирования частоты напряжения питания двигателя, в результате чего отсутствуют пусковые токи и перегрузка силовых цепей на выходе FAT.

Представленная на рис. 2 схема является стандартной схемой системы FAT. По желанию Заказчика APS Energia может расширить функции системы, как показано на рис. 3 и 4.

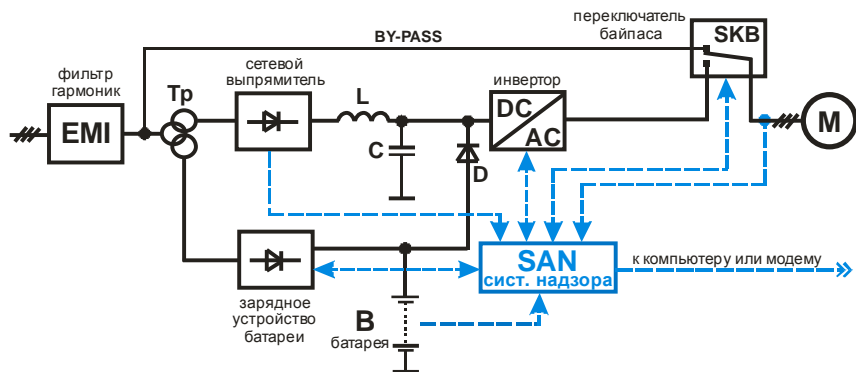


Рис. 2. Блок-схема FAT для питания асинхронного двигателя

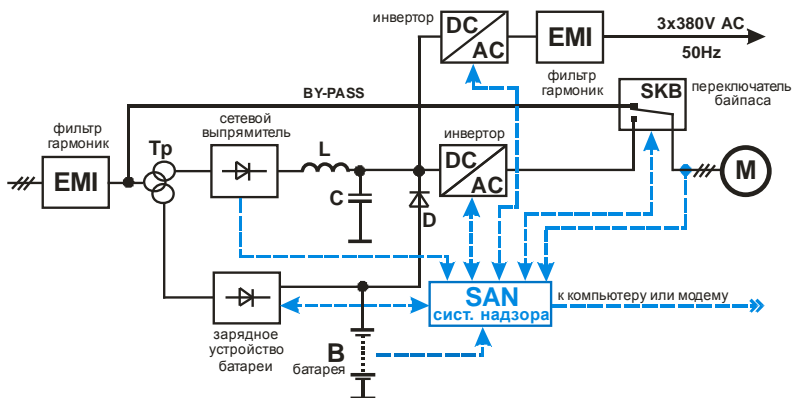


Рис. 3. Блок-схема FAT с возможностью гарантированного питания дополнительных потребителей

Данная система обеспечивает гарантированное питание дополнительных потребителей за счет применения второго инвертора.

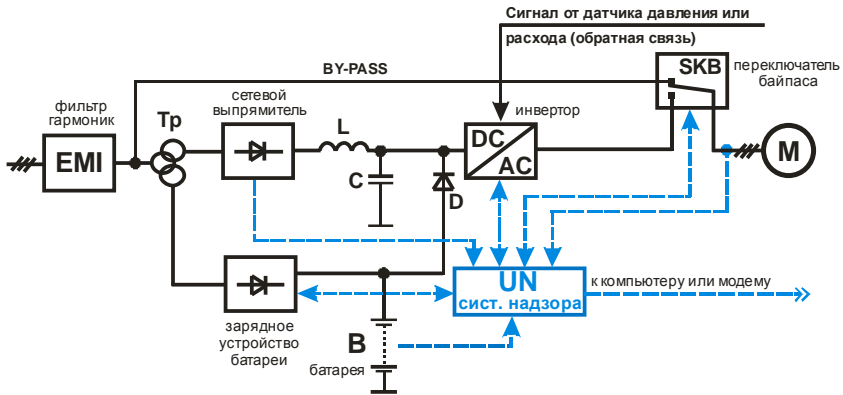


Рис. 4. Блок-схема FAT для питания двигателя насоса с регулированием от датчиков давления или расхода в трубопроводе, в котором работает насос

В данной системе возможность регулирования частоты напряжения, питающего двигатель, позволяет регулировать производительность насоса. Это обеспечивает стабилизацию давления или расхода в системе, к которой подключен насос.

3. Преимущества использования системы FAT производства APS Energia

- В качестве двигателя приводной системы используется очень простой и дешевый асинхронный электродвигатель.
- В сети отсутствуют броски тока, потребляемого системой FAT при пуске двигателя. Рис. 5,б представляет запуск двигателя насоса, запитанного от системы FAT. Пусковой ток двигателя равен номинальному току, но при этом двигатель сразу после пуска развивает максимальный момент на валу. Данный режим работы достигается за счет автоматического регулирования частоты и напряжения питания на выходе FAT. Это значительно облегчает запуск любого двигателя, а особенно тяжелый запуск двигателя, например, запуск мазутного насоса зимой. Для сравнения, момент на валу и протекание тока в двигателе, запитанном от электрической сети или от стандартного UPS, представлены на рис. 5,а.
- Путём введения в систему FAT обратной связи от приводной системы, например сигналов от датчиков давления или расхода трубопровода, можно легко регулировать параметры установок, в которых работают насосы, приводом которых являются асинхронные двигатели (регулируемая частота выходного напряжения FAT).

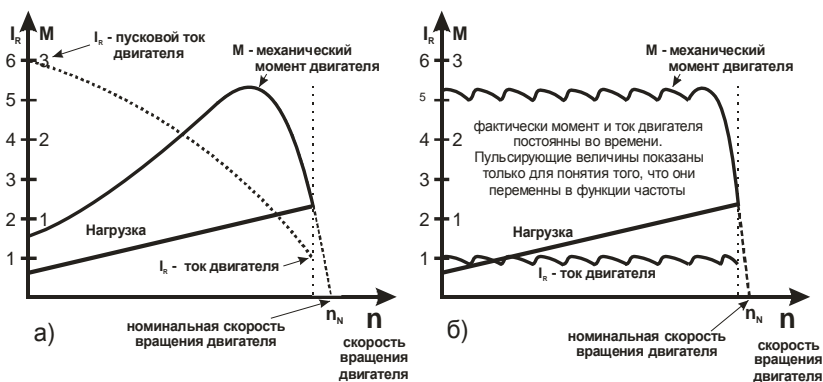


Рис. 5. Сравнение момента асинхронного двигателя и его тока для случаев: а) двигатель запитан от электрической сети или от UPS; б) двигатель запитан от системы FAT

- Путём установки дополнительных элементов в систему FAT:
 - а) появляется возможность запитать дополнительных потребителей стабильным переменным напряжением;
 - б) после запуска и синхронизации с напряжением сети, двигатель, питающийся от FAT, может быть переключен на питание от электрической сети. При исчезновении напряжения в сети FAT выполнит обратное переключение и обеспечит работу двигателя от аккумуляторных батарей. Данное решение аналогично функции Ву-pass, используемой в стандартном UPS.
- Путём установки дополнительного программатора, система FAT может обеспечить при больших мощностях и стартовых нагрузках запуск двигателя в запрограммированном под его индивидуальные параметры режиме.

*Е.А. Конова, асп., В.Г. Гарке, д.т.н. РТУ, проф.
(КНИТУ им. А.Н. Туполева)*

АНАЛИЗ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110-220 КВ ОТ ВСЕХ ВИДОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Дистанционная защита (ДЗ) – это универсальная защита от коротких замыканий (КЗ). Ее принцип действия основан на измерении и оценке полного сопротивления при КЗ, которое, в общем случае, пропорционально расстоянию от места установки защиты до точки КЗ [1].

Основным требованием, предъявляемым к характеристикам измерительных органов (ИО) сопротивления ДЗ, является обеспечение действия при одних удаленностях повреждений и недействия при других удаленностях и в режимах отсутствия повреждений. Для обеспечения этого требования, ИО сопротивления должен иметь характеристику срабатывания, охватывающую, по крайней мере, линию входного сопротивления при металлических повреждениях на линии. Однако подобная узкая характеристика не обеспечивает полноценную защиту вследствие того, что необходимо учитывать влияние ряда других факторов [2]. Рассмотрим их подробнее на примере ДЗ в составе шкафа типа ШЭ2607 021 производства ООО «НПП ЭКРА» [3], характеристики срабатывания ИО сопротивления которой изображены на рис. 1.

1. Переходное сопротивление в месте повреждения. Наличие данного фактора обуславливает необходимость расширения характеристики для охвата области входных сопротивлений при КЗ через переходное сопротивление.

Правая боковая, нижняя и верхняя правые части характеристики ИО сопротивления предназначены для обеспечения срабатывания ИО при КЗ через переходное сопротивление.

В случае междуфазных КЗ переходное сопротивление в месте КЗ – это сопротивление электрической дуги [2]

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{д}} / 2, \quad (1)$$

где $R_{\text{д}}$ – сопротивление электрической дуги.

В случае однофазных КЗ на землю – это сумма сопротивлений электрической дуги между проводом и опорой и эквивалентного сопротивления опоры относительно земли

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{д}} + R_{\text{оп}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{оп}}$ – сопротивление опоры и ее заземления.

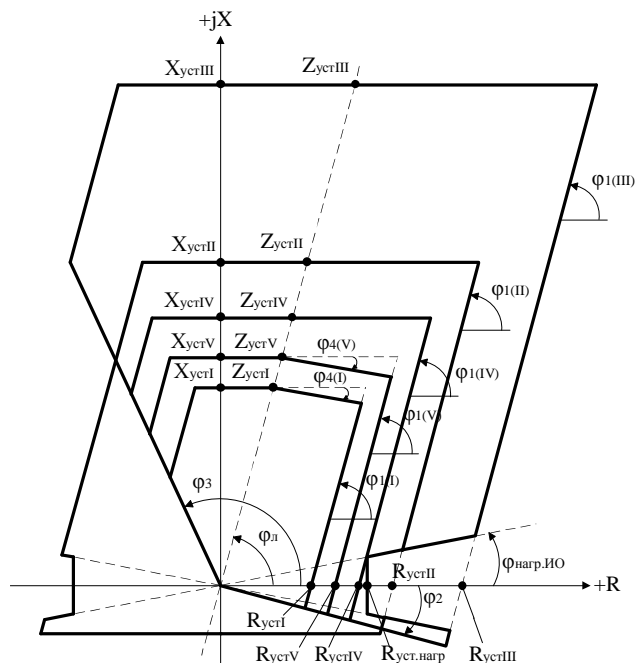


Рис. 1. Характеристики срабатывания ИО сопротивления ступеней ДЗ

Переходное сопротивление в месте КЗ, измеряемое ИО сопротивлением, равно:

- при междуфазном КЗ и одностороннем питании

$$R_{\text{пер.изм}} = R_{\text{д}} / 2; \quad (3)$$

- при междуфазном КЗ и двухстороннем питании

$$\bar{z}_{\text{пер.изм}} = 0,5 \frac{\bar{U}_{\text{д}}}{\bar{I}_{\text{I}}} = 0,5 \frac{U_{\text{д}}}{I_{\text{I}}} \cos \delta_1 + j0,5 \frac{U_{\text{д}}}{I_{\text{I}}} \sin \delta_1; \quad (4)$$

- при однофазном КЗ и одностороннем питании

$$R_{\text{пер.изм}} = \frac{R_{\text{д}} + R_{\text{оп}}}{1 + K_{\text{R}}}; \quad (5)$$

- при однофазном КЗ и двухстороннем питании

$$\bar{Z}_{\text{пер.изм}} = \frac{\left(\frac{U_{\text{д}} + R_{\text{оп}} \frac{|\bar{I}_I + \bar{I}_{II}|}{I_I}}{I_I} \right) \cos \delta_1}{1 + K_R} + j \frac{\left(\frac{U_{\text{д}} + R_{\text{оп}} \frac{|\bar{I}_I + \bar{I}_{II}|}{I_I}}{I_I} \right) \sin \delta_1}{1 + K_X}, \quad (6)$$

где $U_{\text{д}}$ – вектор напряжения на дуге, совпадает по направлению с вектором тока через дугу; I_I – вектор тока, который подается на ИО сопротивления; δ_1 – угол между вектором тока I_I и вектором суммы токов через дугу $I_I + I_{II}$; K_R , K_X – коэффициенты компенсации тока нулевой последовательности линии по осям R и X соответственно.

2. Влияние режима нагрузки. Характеристика ИО сопротивления должна иметь такую конфигурацию, чтобы области нахождения входного сопротивления в нагрузочном режиме не пересекались с областями срабатывания.

В шкафах ШЭ2607 021, ШЭ2607 021021 предусмотрена возможность снижения чувствительности ИО сопротивления ДЗ к активной составляющей в области углов, соответствующих замерам в режимах нагрузки. Для этого характеристики ИО сопротивления имеют общий вырез области сопротивления нагрузки с параметрами $R_{\text{уст.нагр}}$ и $\varphi_{\text{нагр.ИО}}$.

Наиболее точным способом определения максимальной нагрузки (максимальной передаваемой мощности) является анализ режимов работы линии электропередачи при передаче максимальной мощности.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема энергосистемы в симметричном режиме, где \bar{E}_1 , \bar{E}_2 и \bar{Z}_1 , \bar{Z}_2 – эквивалентные ЭДС и сопротивления системы с двусторонним питанием, приведенные к месту установки ДЗ, включая и участки энергосистемы с протяженными воздушными линиями [2].

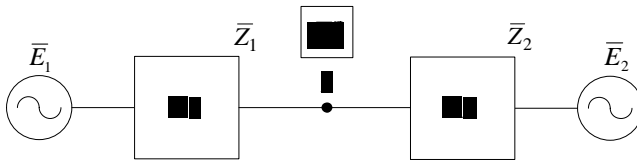


Рис. 2. К анализу ДЗ в нагрузочном режиме

Области расположения вектора полного сопротивления замера ИО сопротивления в нагрузочном режиме определяются исходя из двух ограничений [2]:

- 1) соотношение ЭДС где \bar{E}_1 и \bar{E}_2 по модулю не выходит за пределы

$$q_1 \leq |\bar{q}| \leq q_2, \quad (7)$$

где $q_1 < 1, q_2 > 1$;

2) угол передачи δ из условия устойчивости энергосистемы не должен выходить за пределы

$$\delta_1 \leq \arg \bar{q} \leq \delta_2, \quad (8)$$

где $\delta_1 > -90^\circ; \delta_2 < 90^\circ$.

Результирующие области нагрузочных режимов определяются как общие для условий 1 и 2 и находятся вне дуг окружностей [2]. Так, например, при $\delta_1 = -15^\circ, \delta_2 = 15^\circ$ области нагрузочных режимов в соответствии с рис. 3 ограничены дугами 1, 2, 7 в I и IV квадрантах и дугами 1, 2, 6 во II и III квадрантах плоскости Z .

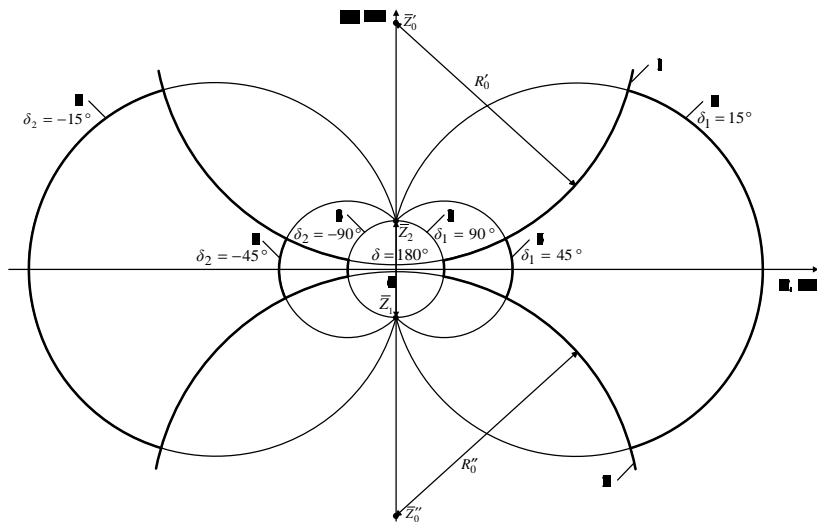


Рис. 3. Области расположения входного сопротивления ДЗ в нагрузочных режимах

3. Влияние режимов качаний и асинхронного хода. Должно быть обеспечено отсутствие срабатывания дистанционной защиты в режимах качаний и асинхронного хода с учетом возможных траекторий вектора входного сопротивления.

4. Параллельные линии. На замер ИО сопротивления при однофазных КЗ оказывает влияние взаимоиנדукция с параллельной линией.

Влияние параллельной линии сильно зависит от режимов работы двухцепной линии.

Уставки ступеней защит на двухцепных линиях должны быть подобраны так, чтобы, с одной стороны, защищаемая зона была достаточной если обе линии включены в работу; а с другой стороны, нельзя допускать слишком большого излишнего охвата, если одна из параллельных линий отключена и заземлена на обоих концах.

Библиографический список

1. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. – Перевод с англ. Под ред. Дьякова А.Ф. – М.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
2. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
3. **Руководство** по эксплуатации ЭКРА.656453.049 РЭ. Шкаф дистанционной и токовой защит линии типа ШЭ2607 021021, ШЭ2607 021.

3.3. Хазбулатов, асп., В.Г. Гарке, д.т.н., проф. (КНИТУ-КАИ)

АВТОМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ С ВЫБОРОМ МОМЕНТА ОТКЛЮЧЕНИЯ

Высоковольтный выключатель – коммутационный аппарат, предназначенный для оперативных включений и отключений отдельных цепей или электрооборудования в энергосистеме, в нормальных или аварийных режимах, при ручном или автоматическом управлении.

В зависимости от среды, в которой производят гашение дуги, различают воздушные выключатели, в которых дуга гасится сжатым воздухом, масляные выключатели, в которых контакты помещаются в ёмкость с маслом, а дуга гасится парами масла, элегазовые выключатели, в которых используется электропрочный газ SF₆-элегаз, и вакуумные выключатели, в которых дугогашение происходит в вакууме – в так называемой вакуумной дугогасительной камере (ВДК). Защитная среда одновременно с дугогашением обеспечивает и диэлектрическую прочность промежутка между контактами в отключенном положении, от чего зависит и величина хода контактов [1].

Высоковольтные выключатели представляют собой сложную конструкцию, управляемую электромагнитными, пружинными, пневматическими или гидравлическими приводами. По большому счету, принцип действия всех видов выключателей похож и заключается в подаче на-

пряжения на соленоиды (контакты, которые затем своими контактами замыкают цепи соленоидов) включения или отключения от так называемых шинок питания, и затем путем высвобождения контактами соленоидов или приводимыми ими в движение механизмами заранее запасенной энергии коммутируется силовая часть выключателя. Чем более современным является выключатель, тем больше в его цепи становится контролируемых параметров (блокировка от многократных включений, контроль готовности привода, контроль длительности сигнала на включение/отключение...). Однако все они контролируют либо состояние самого выключателя, либо исправность управляющей системы, в роли которой в настоящее время практически всегда выступают микропроцессорные блоки управления. Более того, используемые микропроцессорные блоки также контролируют состояние управляемого выключателя.

Основные недостатки существующих схем автоматического управления выключателя следующие:

- отключение выключателя происходит по команде от ключа или от релейной защиты вне зависимости от процессов и режимов в первичной сети;
- включение выключателя происходит также без учета процессов и режимов первичной сети, предшествующих самому включению;

Главной причиной, ограничивающей срок службы выключателя, является коммутируемый ток. Проведем анализ переходного процесса при однофазном коротком замыкании, приняв при этом, что ток нагрузки пренебрежимо мал, либо отсутствует. Рассмотрим два крайних случая:

1. Аperiodическая составляющая тока однофазного короткого замыкания максимальна;

2. Аperiodическая составляющая тока однофазного короткого замыкания равна нулю.

Ниже, согласно [2], приведена формула определения полного тока короткого замыкания (1)

$$i = i_{\text{пер.}} + i_{\text{апери.}}, \quad (1)$$

где $i_{\text{пер.}} = I_{\text{кз}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_{\text{кз}}); \quad (2)$

$$i_{\text{апери.}}(t_0) = i_{\text{нагр.}}(t_0) - i_{\text{пер.}}(t_0). \quad (3)$$

Допустим, что $I_{\text{нагр}} \ll I_{\text{кз}}$, тогда выражение (3) примет вид

$$i_{\text{апери.}} = -i_{\text{пер.}}(t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{T_a}}. \quad (4)$$

В первом случае уравнение (1) примет вид

$$i = I_{кз} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_{кз}) - I_{кз} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{T_a}}, \quad (5)$$

или

$$\frac{i}{I_{кз}} = \sin(\omega \cdot t - \varphi_{кз}) - e^{-\frac{t-t_0}{T_a}}. \quad (6)$$

Во втором случае уравнение (1) примет вид

$$\frac{i}{I_{кз}} = \sin(\omega \cdot t - \varphi_{кз}) - e^{-\frac{t-t_0}{T_a}}. \quad (7)$$

На рис. 1 и 2 приведены, соответственно, графики функций для первого и второго случая (время указано в мс).

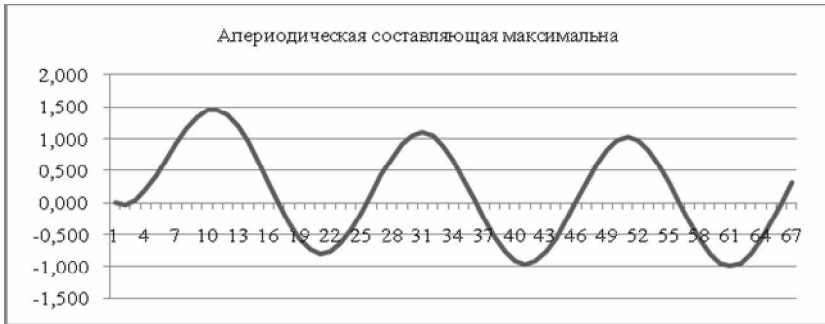


Рис. 1. Периодическая составляющая (время в мс)

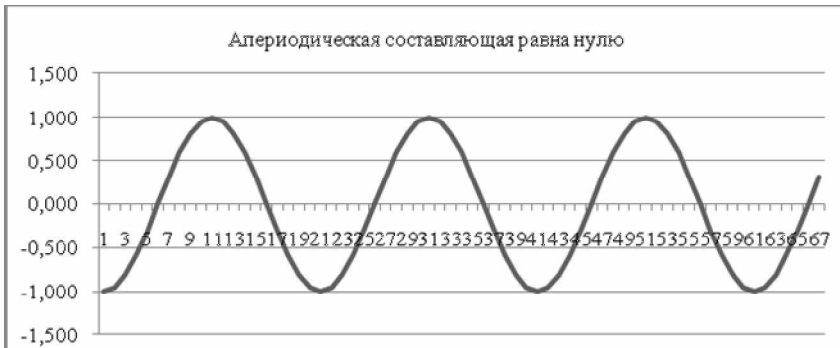


Рис. 2. Полный ток (время в мс)

Таким образом, можно создать блок, который будет определять момент отключения выключателя, при котором износ будет минимальным. Блочная схема такого блока приведена на рис. 3.

Блок, анализируя текущие параметры системы $i(t)$, $di(t)$ при заданных характеристиках выключателя, будет определять момент подачи сигнала на отключение в цепь выключателя. На рис. 4 представлена функциональная схема работы БЛВМО при однофазных коротких замыканиях.

В предлагаемом блоке организованы две параллельно работающие цепочки (рис. 3), анализирующие состояния системы – это блок определения вида повреждения (БОВП), и блок анализа синусоиды тока (БАСТ).

Работа БОВП заключается в определении вида повреждения и на какой фазе произошло короткое замыкание, и выдачу соответствующего разрешающего сигнала.

В блоке БАСТ происходит выделение синусоиды тока. При переходе синусоиды тока через нуль на выходе блока выдается импульс.

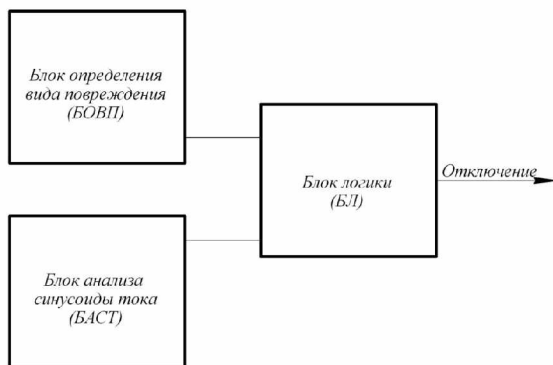


Рис. 3. Блочная схема работы Блока логики выбора момента отключения (БЛВМО)

Информация с этих блоков обрабатывается блоком логики (БЛ), в котором при подаче разрешающего сигнала от одного из выходов БОВП на логический элемент «И» и появлении импульса от БАСТ проходит импульс на «Тактовый счетчик». Данный элемент выдает импульсы на двух выходах. На выходе «1» – при нечетном количестве импульсов на входе, на выходе «2» – при четном. Затем, с разными выдержками времени $DT1$ и $DT2$ подается сигнал на отключение. При одновременном наличии сиг-

нала отключения от блока защиты и от БЛВМО окончательно формируется и выдается команда на отключение.

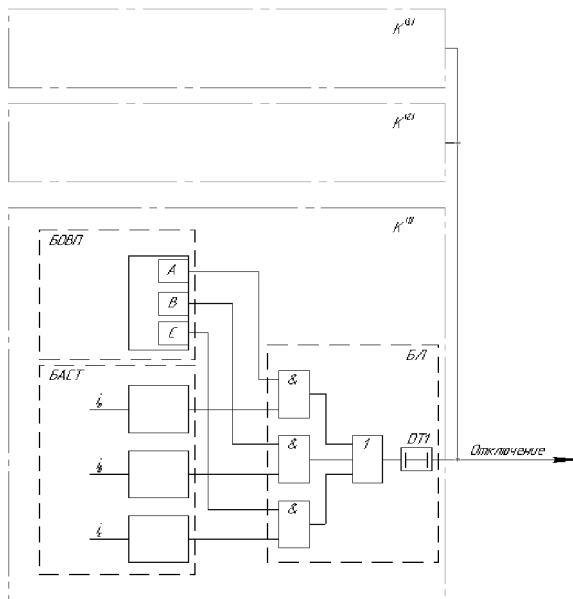


Рис. 4. Логика работы БЛВМО при однофазных коротких замыканиях

Выдержка времени $DT1$ задается уставками. Данная уставка задается в зависимости от вида выключателя или, точнее, в зависимости от времени начала размыкания контактов выключателя при подаче команды на отключение.

Преимущества данного блока:

- увеличивается ресурс выключателя;
- уменьшается вероятность залипания контактов выключателя при протекании больших токов короткого замыкания.

Библиографический список

1. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ. – М.: Папирус Про, 2005. – 624 с.
2. Виославский В.Н., Пивняк Г.Г., Несен Л.И., Рыбалко А.Я., Прокопенко В.В. Переходные процессы в системах электроснабжения. – Киев: Выша школа, 1989. – 422 с.

Н.Б. Ильичев, к.т.н., доц., А.Н. Вермаховский, асп. (ИГЭУ)

РАСЧЕТЫ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

При проектировании низковольтной распределительной сети приходится решать достаточно широкий круг взаимосвязанных задач. Это разработка конфигурации сети с точки зрения обеспечения необходимого уровня надежности, определение расчетных нагрузок элементов сети с учетом режимов работы и выбор оборудования по расчетному току, расчеты потерь напряжения и выбор параметров для обеспечения допустимых потерь напряжения в нормальных режимах и при пусках двигателей. Расчет токов коротких замыканий, выбор и проверка оборудования по стойкости электродинамическому и термическому действию токов короткого замыкания, расчет минимальных токов коротких замыканий и проверка чувствительности защитных аппаратов и выбор их уставок.

При выборе стандартных блоков оборудования может оказаться, что решения, принятые на предыдущем этапе, реализовать невозможно. В этом случае понадобятся уточнения схем и, соответственно, повторные расчеты.

Для обеспечения надежного электроснабжения особо ответственных потребителей собственных нужд ТЭС широко используются системы гарантированного питания с аккумуляторными батареями. Используются схемы, в которых в нормальных режимах работы питание потребителей осуществляется от сети переменного тока, а в аварийных режимах – от сети постоянного тока с использованием аккумуляторных батарей и инверторов, то есть для питания ответственных механизмов могут использоваться как приводы постоянного тока, так и приводы переменного тока с инверторами. При проектировании таких сетей необходимо иметь возможность в одной модели производить расчет как сети переменного, так и постоянного тока с возможностью переключения потребителей от питающей сети к резервному источнику на аккумуляторных батареях. Для таких сетей необходимо определение расчетных нагрузок потребителей постоянного тока, выбор аккумуляторных батарей по времени необходимого гарантированного питания, и, так как возможно переключение потребителей от одного источника к другому, необходимо согласование ус-

тавок защит сети постоянного тока, возможно и согласование их с защитами сети переменного тока.

Электроустановки постоянного тока являются важной составной частью системы электроснабжения различных типов потребителей промышленных предприятий, обеспечивающей управляемость и живучесть электростанций и подстанций. Фрагмент такой сети представлен на рис.1.

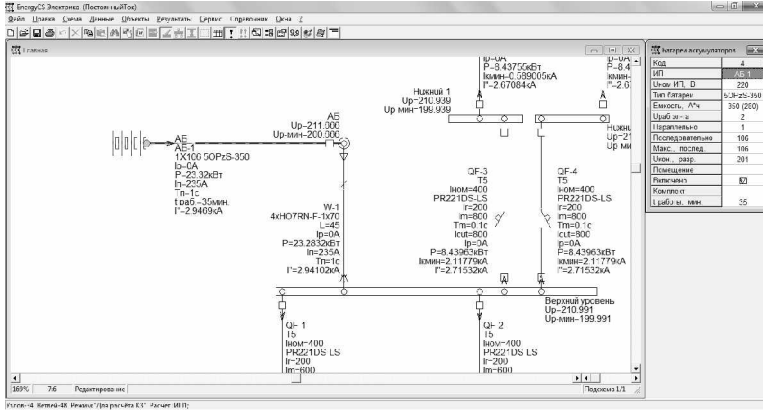


Рис. 1. Фрагмент сети постоянного тока, питающейся от аккумуляторной батареи

Одним из наиболее опасных аварийных режимов в электроустановках постоянного тока является короткое замыкание. Режим КЗ в значительной степени определяет массу, габаритные размеры, конструкцию электрооборудования, объем и состав защитной аппаратуры автоматике, схемы и правила эксплуатации электроустановок. Возникает необходимость определения максимально и минимально возможных значений токов КЗ. К факторам, влияющим на снижение значений токов КЗ и часто не учитываемым при расчете, относятся: влияние активного сопротивления электрической дуги в месте КЗ; тепловой спад тока, вызванный увеличением активного сопротивления проводников вследствие их нагрева током КЗ; возникновение дуги в месте КЗ; переходное сопротивление разъемных контактов; зависимость параметров аккумуляторной батареи от температуры окружающей среды и степени ее разрезненности, а также старение аккумуляторных батарей (АБ).

Системы собственных нужд состоят из комплекса различных параллельно работающих источников таких как система, аккумуляторная батарея, генераторы постоянного тока и статические преобразователи. В свя-

зи с этим возникают особые условия КЗ, связанные с взаимным влиянием на ток КЗ различных источников энергии. В аварийных условиях потребители переменного тока могут питаться через инверторное устройство от аккумуляторной батареи, или потребители постоянного тока могут питаться через выпрямитель от сети переменного тока, а аккумуляторная батарея будет в режиме подзаряда. Как видно в разных ситуациях батарея может являться как источником питания, так и потребителем, что определяет необходимость учитывать большое количество вариантов работы системы собственных нужд.

Когда аккумуляторная батарея работает параллельно с сетью и находится в режиме подзаряда через выпрямительное устройство (рис. 2, а), то она является потребителем электроэнергии, ЭДС источника питания больше напряжения подзаряда. При возникновении короткого замыкания происходит подпитка от аккумуляторной батареи, ток которой будет иметь наибольшую долю в полном токе короткого замыкания, так как сопротивление батареи намного ниже сопротивления сети. В таком режиме работы максимальный ток КЗ будет наибольшим и именно он должен приниматься для проверки электродинамической стойкости электрических аппаратов и проводников, а также их поддерживающих и опорных конструкций.

В следующем случае потребители постоянного тока могут питаться от сети через выпрямительное устройство, а аккумуляторная батарея отключена (рис. 2, б). Сопротивление выпрямительного устройства большое, и, как следствие, минимальный ток короткого замыкания в этом случае будет наименьшим, и именно он должен приниматься при выборе аппаратов защиты и расчете их чувствительности. Как правило, этот ток КЗ не превышает зарядный ток, но возникает вероятность, что он будет намного больше рабочего тока, на который рассчитаны кабели, питающие потребителей, поэтому такие токи КЗ необходимо отключать.

Так же потребители могут получать питание только от аккумуляторной батареи. Максимальный ток короткого замыкания может приблизиться к значению тока, возникающего при параллельной работе сети и батареи в том случае, если аккумуляторная батарея будет полностью заряженной. Если же она глубоко разряжена в момент короткого замыкания, например если оно возникло в конце разряда, и температура электролита будет минимальной, то минимальный ток может быть наименьшим, что необходимо учитывать при выборе защитных аппаратов.

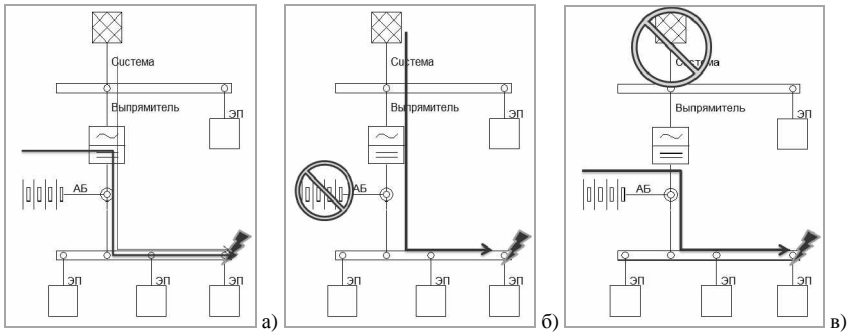


Рис. 2. Режимы совместной работы сети постоянного тока с сетью переменного тока: а) АБ работает параллельно с сетью; б) потребители постоянного тока питаются от сети через выпрямительное устройство, а АБ отключена; в) потребители получают питание только от АБ

$$I_{K3.min} = K_d \frac{nE_{эл}}{nk_R r_{уд} / Q + R_{вш}} , \quad (1)$$

где K_d – поправочный коэффициент, учитывающий сопротивление дуги, зависящий от внешнего сопротивления цепи КЗ и типа источника питания постоянного тока; n – количество последовательно включенных элементов батареи; $E = E_0 - 0,5$ – расчетное значение ЭДС аккумуляторной батареи, учитывающее спрямление ВАХ; k_R – коэффициент увеличения сопротивления в зависимости от температуры для разряженной АБ; $r_{уд}$ – удельное внутреннее сопротивление заряженного аккумулятора при 25°C, Ом.А·ч; Q – ёмкость аккумуляторной батареи; $R_{вш}$ – сопротивление внешней цепи, Ом.

$$R_{вш} = R_{ош} + R_{кб} + R_{пр} + R_{т.к.} + R_{к.с.} , \quad (2)$$

где $R_{ош}$, $R_{кб}$, $R_{пр}$, $R_{т.к.}$, $R_{к.с.}$ – активные сопротивления постоянному току ошиновки аккумуляторного помещения, кабельных линий, проводов, токовых катушек отключающих аппаратов, контактных соединений.

Сети постоянного тока включают в себя стабилизаторы, которые предназначены для стабилизации выпрямленного напряжения или тока в определенных пределах с точностью $\pm 2\%$. Стабилизация напряжения необходима при нормальной работе установки, а так же на второй стадии заряда батареи. Устройство стабилизации напряжения имеет переменный коэффициент трансформации и является активным элементом, его расчет

является итерационным процессом. При наличии стабилизатора приходится многократно уточнять расчет параметров сети, пересчитывать пусковые токи, максимальные и минимальные токи короткого замыкания, вероятность отказа при КЗ, наличие байпаса.

Таким образом, можно сделать вывод, что учет всех факторов, влияющих на расчет сетей переменного тока, работающих совместно с сетями постоянного тока, можно осуществить лишь с использованием ЭВМ. Программный комплекс EnergyCS Электрика предназначен для выполнения расчетов электрических сетей низкого и частично среднего напряжения постоянного и переменного токов при анализе существующих и при проектировании новых систем электроснабжения. В программе применяется объектный подход к моделированию сети. То есть в основе моделирования сети лежит информационная модель, в которой рассматриваются все элементы сети в их функциональной и конструктивной взаимосвязи. При таком моделировании сети становится возможным в одной модели рассматривать разноплановые наборы свойств элементов. Добавление новых модулей в программу позволит рассчитывать гибридные сети с выпрямителями и инверторами, решать ряд вопросов, связанных с проектированием сетей собственных нужд станций и подстанций.

Одним из решений по ограничению токов короткого замыкания, обеспечению чувствительности защитных аппаратов, согласованию уставок или обеспечению допустимости потерь напряжения является изменение структуры сети. Другим решением является изменение параметров элементов сети, выбор более подходящего оборудования. Вопрос оптимизации сети может быть решен на базе программного комплекса EnergyCS Электрика. Первый вариант основан на методе простого перебора, то есть задается определенная структура сети и происходит распределение потребителей так, что бы все нагрузки были взаимосвязаны, резервируемы и подключались к разным источникам питания, защитные аппараты были отстроены от рабочих и пусковых токов, любой минимальный ток отключался основной и резервной защитами. Так как в программе используется объектный подход к формированию модели, то появляется возможность применения экономического критерия, и для оптимизации сети можно применить метод «ветвей и границ», и оптимальным решением будет являться схема с минимальными дисконтированными затратами. Так, например, в системе собственных нужд ТЭС проектировщикам часто приходится выбирать проводники не по допустимому току, а по условиям термической стойкости или невозгоранию при коротких замыканиях, что приводит к существенному увеличению сечения проводников. В этом случае оптимизация структуры сети совместно с

минимизацией приведенных затрат может позволить получить существенно лучшие решения, чем традиционно применяющиеся в настоящее время без оптимизации.

Алгоритм синтеза распределительной сети: имеется перечень электроприемников, предопределенная структура схемы электроснабжения присоединенная к внешней сети; необходимо разместить электроприемники оптимально по выбранным критериям. Условиями и ограничениями будут следующие параметры: координаты размещения, ранжирование ЭП, учет пусковых токов, взаимное резервирование потребителей одинакового назначения. Это должно лечь в формализованный алгоритм расчета в программе.

Из вышесказанного становится понятно, что задача проектирования распределительной сети является комплексной, многоплановой, итерационной и требующей оптимизации, как структурной, так и параметрической.

В рамках развития программного комплекса EnergyCS для получения оптимальных решений предполагается реализовать поисковые методы оптимизации, а в качестве целевой функции может рассматриваться приведенные или дисконтированные затраты с учетом потерь электроэнергии.

Библиографический список

1. Жуков В.В. Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 160 с.
2. Методические указания по расчёту защит в системе постоянного тока тепловых электростанций и подстанций. МУ 37-70-038-83. – М.: СПО СОЮЗТЕХЭНЕРГО, 1983. – 30 с.
3. Дополнение к методическим указаниям по расчёту защит в системе постоянного тока тепловых электростанций и подстанций. МУ 37-70-038-83. – М.: СПО СОЮЗТЕХЭНЕРГО, 1987. – 6 с.
4. ГОСТ 29176-91 Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчёта в электроустановках постоянного тока. – М.: Издательство стандартов, 1992.
5. Циркуляр №Ц-02-98(Э) РАО «ЕЭС РОССИИ» О проверке кабелей на возгорание при воздействии тока короткого замыкания.
6. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания.
7. Лаврус В.С. Источники энергии. – К.: Наука и Техника, 1997. – 112 с.

А.Н. Королёв, к.т.н., проф., К.В. Куликов, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

ЭКОЛОГИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЛЭП

Экологические аспекты переработки твердого, жидкого и газообразного топлива, а также транспортировки полученной электроэнергии в на-

стоящее время являются весьма востребованным и актуальными. Электрическая энергия обладает целым рядом достоинств. Одно из них заключается в вынесении из зон потребления энергии источников интенсивного неблагоприятного экологического воздействия на природу при переработке первичных энергоресурсов. В то же время, отторжение площадей отчуждения земель под ЛЭП и их неблагоприятное электромагнитное воздействие, наряду с экономическими сторонами передачи электрической энергии, делают необходимым поиск путей оптимизации этого процесса.

Одним из направлений повышения технико-экономических показателей является перевод их в многофазный режим [1...7]. Увеличение числа их фаз оказывает влияние на экологические характеристики, к которым относятся максимальная напряженность электрического поля под ЛЭП и ширина зоны отчуждения земель для нее.

Исследования этих характеристик проводилось на примере наиболее просто реализуемой 6 фазной ЛЭП.

Для расчета использовалась разработанная математическая модель расчета многофазных ЛЭП, реализованная в программе «efild».

При этом были приняты следующие параметры: Средняя высота подвеса для всех проводов ЛЭП 10 м. Фазное напряжение: 191 В. при числе составляющих в фазе – 2; 289 В. при числе составляющих в фазе – 3 и 433 В. при числе составляющих в фазе – 5. Расстояние между фазами задавалось из условия обеспечения работы ЛЭП при качании проводов.

Векторная диаграмма фазных напряжений и нумерация фаз показана на рис. 1.

Исследовались различные варианты расположения фаз в пространстве.

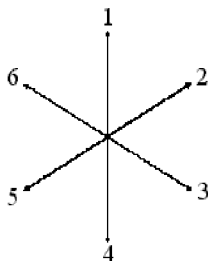


Рис. 1. Векторная диаграмма фазных напряжений и их нумерация

Рассчитанные распределения напряженности электрического поля под ЛЭП для некоторых случаев рассматриваемых вариантов представлены на рис. 2.

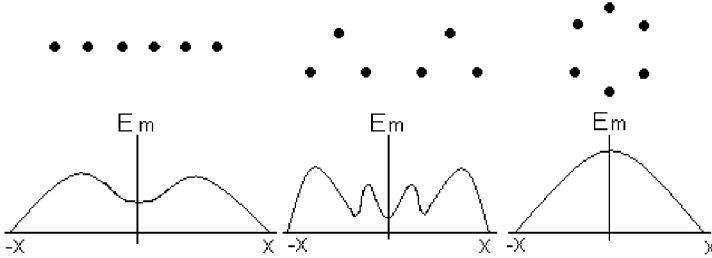


Рис. 2. Распределения напряженности электрического поля под ЛЭП

Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета для 6-ти фазной ЛЭП

Вариант	U_{ϕ} , кВ	P_n , кВт	n	d, дм	r, м	E_m (провод), кВ/см	E_m (на земле), кВ/м	E_m (h=1,8 м), кВ/м
1	191	681,61	2	6	8,5	14,451	4,97	5,189
	289	1799,2	3	6	8,5	17,084	8,658	9,038
	433	4829,8	5	6	8,5	18,64	15,514	16,195
2	191	694,02	2	6	8,5	14,774	3,24	3,46
	289	1837	3	6	8,5	17,463	5,651	6,0312
	433	4951,9	5	6	8,5	19,147	10,168	10,852
3	191	751,11	2	6	6	15,996	2,633	2,824
	289	2014	3	6	6	19,228	4,657	4,992
	433	5536	5	6	6	21,516(*)	8,544	9,159

Для сравнения были проведены расчеты трехфазных ЛЭП с линейным (вариант I) и по окружности (вариант II) расположением фаз. Результаты расчета показаны в табл. 2.

Таблица 2. Результаты для расчета 3-х фазной ЛЭП

Вариант	U_{ϕ} , кВ	P_n , кВт	n	d, дм	r, м	E_m (провод), кВ/см	E_m (на земле), кВ/м	E_m (h=1,8 м), кВ/м
I	191	375	2	6	8,5	15,9	5,15	5,416
	289	1005,4	3	6	8,5	19,097	9,112	9,58
	433	2762,8	5	6	8,5	21,327(*)	16,712	17,57
II	191	386,64	2	6	6	16,433	3,8	4,053
	289	1042	3	6	6	19,798	6,76	7,2
	433	2886,7	5	6	6	22,316(*)	12,5	13,323

В табл. 1 и 2 приняты следующие обозначения: U_{ϕ} – фазное напряжение; P_n – натуральная мощность линии; n – число составляющих в фазе; d – расстояние между составляющими фазы; r – расстояние между фазами ЛЭП; E_m (провод) – максимальная напряженность на фазном проводе; E_m (на земле) – максимальная напряженность на поверхности земли под линией; E_m ($h = 1,8$ м) – максимальная напряженность под ЛЭП на высоте 1,8 м.

На рис. 3 представлены результаты исследований максимальной напряженности непосредственно под линией.

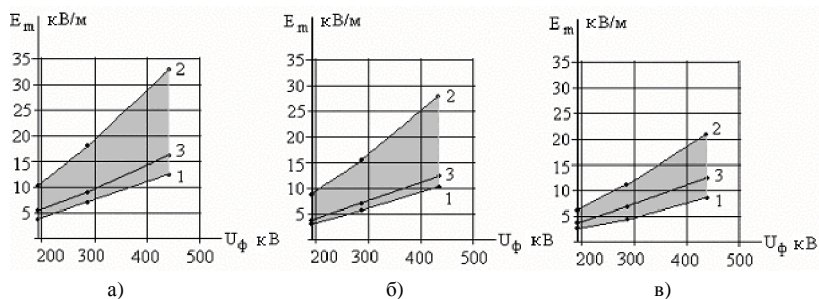


Рис. 3. Напряженность электрического поля под ЛЭП

Здесь кривые 1 и 2 – уровни максимальной напряженности поля под ЛЭП для линий, показанных на рис. 2 при различных расположениях фаз и фазных напряжениях. Зависимость 3 – уровень максимума напряженности в соответствующей трехфазной линии.

На рис. 3 (а ... в) показаны минимальные (1) и максимальные (2) уровни напряженностей под линией, показанной на рис. 1 при различных фазных напряжениях. Зависимость 3 показывает уровень максимума напряженности в соответствующей трехфазной линии.

Анализ результатов расчета показывает, что многофазные ЛЭП при большей мощности, передаваемой в одном габарите, могут быть спроектированы таким образом, что один из экологических показателей – напряженность электрического поля – может быть улучшен по сравнению с трехфазными ЛЭП.

Другим параметром, характеризующим экологичность линий электропередач, является количество отторгаемой земли и ширину вырубаемых просек. Для оценки этого фактора было проведено сравнение передаваемой мощности на один метр земли по ширине ЛЭП. Обозначим этот

параметр как $P_{уд}$ (кВт/м). Результаты сравнения для линейного расположения фаз показаны в табл. 3, для расположения в виде треугольников – в табл. 4, а для расположения фаз по окружности – в табл. 5.

Таблица 3. Результаты сравнения для линейного расположения фаз

$U_{ф}, В$	$P_{уд} (max), кВт/м$	$P_{уд} (min), кВт/м$	$P_{уд} (3-х фазн.), кВт/м$
191	17,753	16,038	22,05
289	47,633	42,334	59,141
433	131,106	113,642	162,518

Таблица 4. Результаты сравнения для расположения фаз в виде треугольников

$U_{ф}, В$	$P_{уд} (max), кВт/м$	$P_{уд} (min), кВт/м$	$P_{уд} (3-х фазн.), кВт/м$
191	29,081	27,216	45,412
289	77,808	70,039	122,588
433	213,161	194,192	339,612

Таблица 5. Результаты сравнения для расположения фаз по окружности

$U_{ф}, В$	$P_{уд} (max), кВт/м$	$P_{уд} (min), кВт/м$	$P_{уд} (3-х фазн.), кВт/м$
191	79,539	72,185	45,412
289	217,038	193,538	122,588
433	613,221	531,923	339,612

Результаты расчетов показывают, что линейное и треугольное расположение проводов на основе обеспечения безопасного расстояния между фазами из условия учета качания проводов в пролете, приводит к увеличению зоны отчуждения земли в расчете на кВт передаваемой мощности. Это связано с наличием такого же промежутка между трехфазными группами в шестифазной системе, как и между фазными. При этом анализ данных в табл. 2 и 3 указывает на то, что в шестифазной ЛЭП возможно уменьшение междуфазного расстояния из условия достижения допустимой напряженности поля на проводе, что может улучшить показатель по зоне отчужденной земли, сделав его выше трехфазного варианта. Однако это потребует разработки жесткой междуфазной изоляции в пролете с целью исключения опасности пробоя воздушного промежутка при качании проводов. В то же время, расположение фаз по окружности при том же междуфазном расстоянии позволяет значительно повысить рассматриваемый показатель.

Выводы

1. Увеличение числа фаз ЛЭП с трех до шести позволяет воздействовать на распределение напряженности электрического поля под линией за счет конструктивного расположения фаз и, тем самым, улучшать экологичность линии. Наиболее экологически предпочтительней является ЛЭП с расположением фаз по окружности;

2. Повышение натуральной мощности ЛЭП при увеличении числа фаз позволяет значительно уменьшить зону отчуждения земли на кВт передаваемой мощности при оптимальном расположении фаз по окружности;

3. Анализ полученных результатов указывает на возможность варьированием расположения фаз в любом из вариантов изменять напряженность электрического поля в широких пределах, что невозможно сделать в трехфазной линии. При этом имеется возможность получать напряженность поля ниже, чем в трехфазном варианте.

Библиографический список

1. **Королев А.Н., Куликов К.В., Коротков В.В.** Особенности построения многофазных линий электропередачи. Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ (выпуск 4). – Иваново, 2001 г.
2. **Королев А.Н., Коротков В.В., Куликов К.В.** Сравнительный анализ трехфазных и многофазных ЛЭП // Межвузовский сборник научных трудов по электротехнике. – Иваново. 1998. – с.32.
3. **Королев А.Н., Куликов К.В.** Число фаз как фактор оптимизации характеристик электроэнергетических систем // Межвузовский сборник научных трудов по электротехнике. – Иваново. 1998. – с. 35.
4. **Горшенгори А.И.** Многофазные линии электропередач высокого и сверхвысокого напряжения. Электрические станции. 1994 г. № 8.
5. **Gulker W.L., Shankle D.F.** Transmission and Distribution. 1981. v. 33. № 10.
6. **Stewart J.R., Grant I.S.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Sistem. 1982. v. 103. № 11.
7. **Korolev A.N., Kulikov K.V.** Ecology of electric transmission lines // 7th International Symposium, «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering», Estonia, 2009.

*Н.Б. Ильичев, к.т.н., доц., А.И. Кулешов, к.т.н., доц.,
А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц., Е.Н. Ильичева, асп. (ИГЭУ)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СЕТИ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ АНАЛИЗЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ENERGYCS

При проектировании электрических сетей необходим многовариантный анализ перспективных режимов для разных периодов развития сети или этапов ввода проектируемой части в строй. В практике проектирования развития электрических сетей получили распространение так называемые оценочные модели. Использование этих моделей состоит в том,

что проектировщик намечает для сравнения конечное число вариантов развития сети, по каждому из рассматриваемых вариантов выполняется расчет и анализ технико-экономических показателей. Однако рассмотрение законченных оценочных моделей имеет существенный недостаток, в них отсутствует возможность рассмотреть перспективное развитие сети с учетом меняющихся условий: изменения нагрузок, появление новых элементов, смежных с рассматриваемым участком.

Ввод в модель сущности «время» и моделирование процесса развития сети с учетом этого параметра является решением данной проблемы. Однако учет времени интересен не только для анализа структуры модели, но и для возможности оценки изменения параметров установившегося режима, режимов короткого замыкания, потерь энергии и т.п.

Программный комплекс EnergyCS, разработанный при участии авторов, состоит из трех независимых модулей. EnergyCS ТКЗ предназначен для расчетов токов короткого замыкания, EnergyCS Режим выполняет расчеты установившегося режима, EnergyCS Потери выполняет расчет потерь энергии. При этом в программном комплексе используется единая модель, сформированная на основании объектного подхода с использованием базы данных оборудования.

Объектный подход к формированию модели заключается в том, что модель системы собирается из отдельных объектов, элементов сети, обладающих набором свойств-параметров. Параметры каждого элемента можно разделить следующим образом: топологические, условно-графические, схемные и режимные. Схемные параметры могут быть введены индивидуально, а могут определяться по паспортным данным с использованием базы данных справочника. Информация по оборудованию в модели может быть избыточной по отношению к текущему расчету, но использоваться будут лишь те параметры, которые актуальны для расчета. Так, например, сопротивление нулевой последовательности элемента будет храниться в модели, но востребовано будет лишь при расчете несимметричных коротких замыканий.

Поскольку в программном комплексе EnergyCS применен объектный способ ввода модели, расчетная схема создается не как схема замещения, ориентированная на решаемую задачу, а графически, как схема электрическая однолинейная, для каждого объекта вводится совокупность свойств, в том числе, с использованием справочных данных оборудования. Взаимосвязи объектов модели показаны на рис. 1, а вид изображения схемы – на рис. 2.

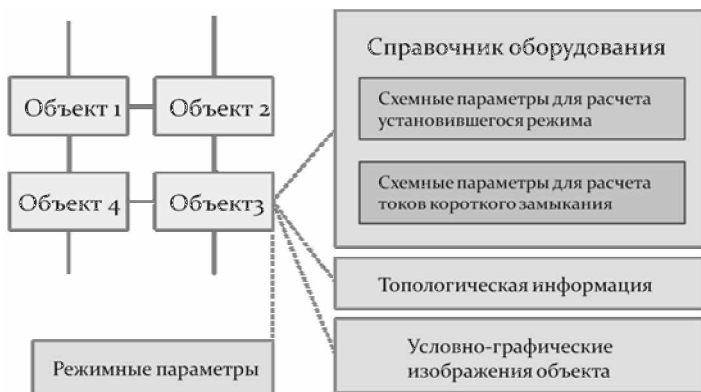


Рис. 1. Структура взаимосвязей объектов информационной модели

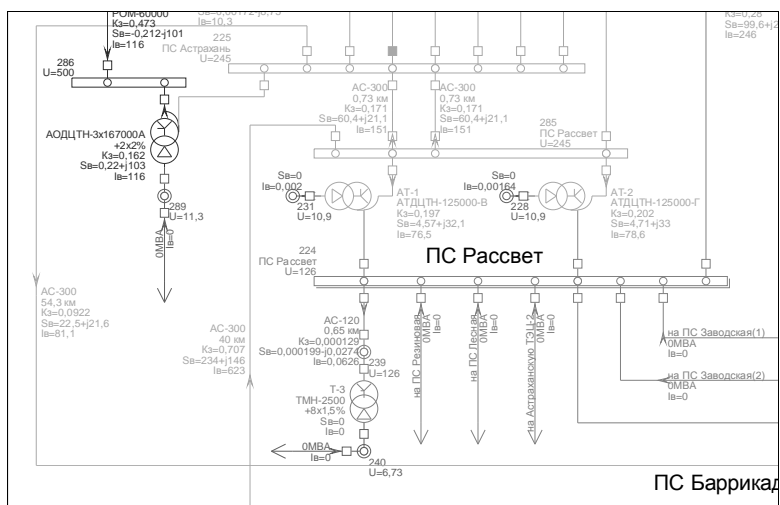


Рис. 2. Пример схемы, подготовленной с использованием объектного подхода

Поскольку в такой объектной модели есть доступ и к параметрам режима, и к справочной базе данных оборудования, эта модель может быть адаптирована к функции автоматического выбора оборудования, что очень важно для решения задач оптимизации на ее основе. Кроме того, в

объектной модели расширение спектра решаемых задач возможно путем увеличения числа свойств объекта без видимых изменений модели. Новая модель, адаптированная для новых задач, сохранит весь объем исходных данных для решения старых задач, например, расчета режима, сможет выполнить эти расчеты, и визуально будет иметь вид электрической однолинейной схемы.

Ввод новой сущности «время» в объектную модель сводится к тому, что в число общих данных должны быть добавлены периоды времени, которые позволяют перейти к интересующему состоянию модели во времени. Одновременно для каждого элемента предусматривается параметр «состояние», который может принимать значение период ввода и состояния на момент вывода. Последнее может принимать значение, согласно статусу элемента в рассматриваемый период: «Существующий»; «Новый»; «Демонтированный»; «Замена»; «Восстановление».

По значению свойства «состояние» определяется время, начиная с которого элемент вводится в эксплуатацию или время вывода из эксплуатации в связи с демонтажем объекта. Состояние «Новый» означает, что на рассматриваемый период элемент запланирован, но в расчете не участвует, состояние «Существующий» означает, что элемент в рассматриваемый период введен в эксплуатацию. Состояние «Демонтированный» показывает, что элемент выведен из эксплуатации. Состояние «Замена» показывает объект сети, у которого была изменена существенная часть. Так состоянием «замена» можно обозначить подстанцию, у которой был заменен трансформатор. Состояние «Восстановление» сообщает о том, что срок эксплуатации объекта истек, и он подлежит реконструкции.

На схеме каждое значение параметра имеет особое графическое обозначение, как показано на рис. 3 и 4. Если определено текущее состояние элемента как нового, то на схеме рис. 3 можно видеть запланированную линию (отмечена точками), которая не участвует в расчете. На схеме рис. 4 для той же модели включен режим первого периода, когда новая линия уже введена, а одна из существующих линий демонтирована (отмечена крестиками).

Для элементов, которые определяют нагрузку сети, предусматривается описание тренда изменения по периодам. Тренд задается вектором коэффициентов роста нагрузки по периодам. Возможно указание отдельных коэффициентов по активной и реактивной мощностям или ввод вектора мощностей P и Q по периодам времени.

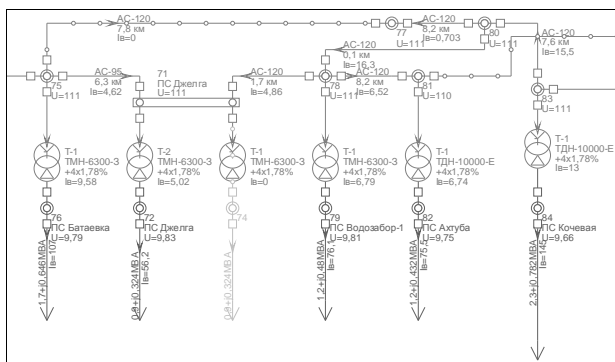


Рис. 3. Пример изображения режима для базового периода

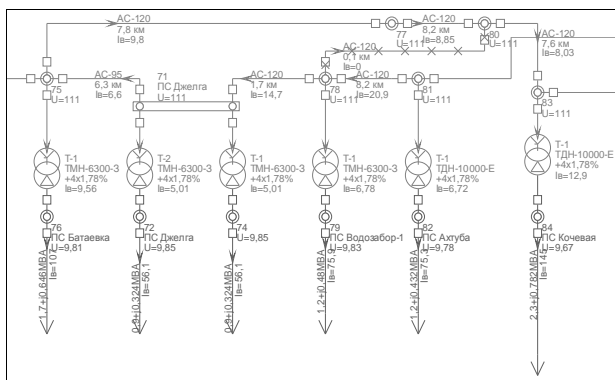


Рис. 4. Пример изображения режима для периода, отличного от базового

Таким образом, для каждого периода времени можно вывести состоящие модели, то есть тот набор элементов и коэффициентов нагрузки, которые соответствуют выбранному периоду. В результате появляется возможность формального получения итоговой документации с результатами расчетов для серий расчетных режимов.

Название отходящих фидеров	Базовый режим 2011			Расчетный режим 2016			Расчетный режим 2021		
	U	I	S	U	I	S	U	I	S
Фидер 1									

Введение в объектную модель электрической сети сущности «время» позволяет анализировать режимы с учетом изменения во времени, отслеживая динамику изменения режимных параметров во времени с учетом изменения нагрузок и ввода в строй новых электросетевых объектов. Это обеспечивает существенное сокращение трудозатрат на получение оптимальных решений и выпуска проектной документации при проектировании.

*Ф.Н. Ясинский, д.ф.-м.н., проф., Н.Б. Ильичев, к.т.н., доц.,
А.И. Кулешов, к.т.н., доц., Д.П. Харитонов, асп. (ИГЭУ)*

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СРЕДСТВАМИ GPU

Расчеты установившихся режимов в электроэнергетических системах являются наиболее массовыми расчетами. Усложнение расчетных моделей, связанное с более детальным представлением сети, значительно увеличивает размерность задачи и затраты времени на получение решения. В то же время, современная вычислительная техника имеет неиспользованный в настоящее время потенциал производительности вычислительных систем, связанный с применением многоядерных процессоров и доступности матричных процессоров в составе видеокарт. То, что данный ресурс пока не используется, обусловлено тем, что распараллеливание процесса расчета установившегося режима связано с разработкой специальных вычислительных алгоритмов. Известно, что расчет установившегося режима, как правило, состоит в решении системы нелинейных уравнений узловых напряжений, которые могут быть записаны в форме баланса мощностей или в форме баланса токов. При этом матрица коэффициентов левой части уравнения является слабозаполненной. Таким образом, речь идет о распараллеливании процесса решения системы нелинейных уравнений.

Для начала рассмотрим оборудование, с использованием которого предполагается получить решение. Учет особенности его работы необходим для эффективного расчета УР.

Тенденции последних лет к увеличению числа полупроводниковых элементов на устройстве, которые можно было бы использовать в вычислениях, привели к созданию GPGPU (General-Purpose Graphics Processing Units) – технологии использования графического процессора видеокарты

для выполнения расчётов в приложениях для общих вычислений, которые обычно проводит центральный процессор. На рис. 1 представлено схематичное изображение архитектуры центрального процессора и графического процессора, демонстрирующее разницу в архитектуре этих двух устройств.

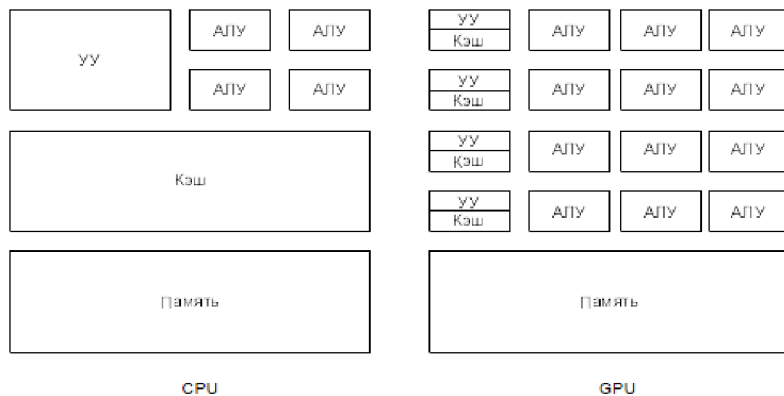


Рис. 1. Схематичное изображение архитектуры центрального и графического процессоров

Как видно, графический процессор обладает большим количеством ядер, но справедливости ради следует отметить, что ядра GPU предназначены только для вычислений и имеют меньшее количество инструкций по сравнению с CPU. Соответственно, исходя из различной организации архитектур устройств логично предположить, что использование меньшего числа ядер с большим количеством инструкций рационально для использования параллелизма по задачам (MIMT – Multiple Instructions Multiple Threads), а использование устройства с большим количеством параллельно работающих ядер оптимально для распараллеливания по данным (SIMT – Single Instruction Multiple Threads).

Для понимания особенностей реализации алгоритмов для GPU необходимо иметь представление об архитектуре устройства с точки зрения логической компоновки вычислительных элементов. Архитектура GPU в терминах технологии CUDA представлена в [6] (альтернатива CUDA – OpenCL, имеет очень похожую архитектуру, только используется другая терминология, но сути программирования под GPU с использованием OpenCL это не меняет).

Также стоит отметить наличие различных типов памяти в GPU-устройстве (рис. 2).

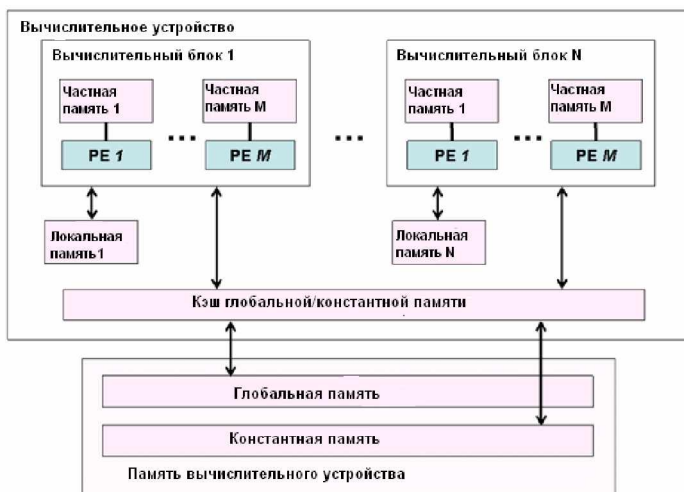


Рис. 2. Модель памяти GPU

Различные типы памяти имеют различные скорости доступа. Так, например, самая медленная память – глобальная (global), далее идут локальная (local) и частная (private). Но и объемы у различных типов памяти разные. Так, глобальная память – это вся оперативная память компьютера, как правило, достигает объема в несколько гигабайт. А локальная и частная память намного меньше, как правило, несколько десятков килобайт.

Расчет установившегося режима подробно представлен в [1]. Тут же мы лишь опишем его в общем виде и приведем некоторые рассуждения, касающиеся возможности ускорения его расчета.

Общие этапы алгоритма таковы:

- получение матрицы узловых проводимостей на вход (процесс формирования этой матрицы в рамках данной статьи рассмотрен не будет, дополнительную информацию по этому этапу можно найти в [1]);
- задание начальных приближений напряжений узлов (искомых переменных). В качестве первого приближения берутся номинальные напряжения узлов, которые в дальнейшем корректируются на последующих итерациях выбранного математического метода;

- определение величины небалансов мощностей;
- формирование матрицы Якоби;
- решение системы линейных уравнений;
- определение новых значений напряжений и фазовых углов напряжений;
- проверка условий окончания расчета и возврат на п.3, если это необходимо.

Формулы для расчета матрицы Якоби представлены в [1]. Здесь упомянем лишь, что расчет этой матрицы очень хорошо подходит под парадигму SIMT и дает неплохое ускорение на данном этапе.

Следующим этапом является расчет системы линейных уравнений. Выбор математического метода является одной из важных составляющих, ведущих к успешному решению поставленной задачи.

Существует множество способов решения системы линейных уравнений, которые можно подразделить на 2 больших класса – прямые и итерационные математические методы. Прямые методы дают точное решение за N шагов, итерационные методы дают приближенное решение, выполняя большее количество шагов, но распараллеливание этих методов может дать ускорение по времени. Выбор того или иного математического метода является отдельной задачей, на которой здесь останавливаться не будем. Описание некоторых математических методов решения системы линейных уравнений можно найти в [2–5], а сравнение некоторых из этих методов можно обнаружить в [3–5].

Основным недостатком итерационных методов является их нестабильность, выраженная в несходимости итерационного процесса для некоторых состояний исходных данных. Обеспечение сходимости математического метода представляет собой отдельную область исследования вычислительной математики, и решение зависит от поставленной задачи и носит конкретный характер, поэтому универсального способа улучшить сходимость того или иного математического метода нет.

В данный момент ведутся исследования по стабилизации реализованного математического метода BiCGStab согласно [2, 4, 5].

Библиографический список

1. Кулешов А.И., Прахин Б.Я. Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: Учеб. пособие. Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. – 171 с.
2. Чадов С.Н. Некоторые вопросы численного моделирования динамических систем / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 120 с.

3. **Баладин М.Ю., Шурина Э.П.** Методы решения СЛАУ большой размерности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 70 с.
4. **Голуб Дж., Ван Лоун Ч.** Матричные вычисления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
5. **BiCGstab(L)** for linear equations involving unsymmetric matrices with complex spectrum, Gerard I.g. Sleijpen, Diederik G. Fokkema, Electronic Transactions on Numerical Analysis. Volume 1, pp. 11-32, September 1993.
6. **Решение** СЛАУ большой размерности на базе графического процессора в задаче построения изоповерхностей Бабков В.С., Титаренко К.К. Донецкий национальный технический университет. Наукові праці ДонНТУ, серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка" Випуск 10(153) – Донецьк: ДонНТУ, 2009, сс. 160 – 166.

С.А. Словесный, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

ПРИМЕНЕНИЕ МОСТОВЫХ СХЕМ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При нынешнем состоянии российской энергетики, когда, по различным оценкам, 40÷60 % основного силового оборудования выработало свой ресурс, велика вероятность внезапных аварий и отказов оборудования. В 1990 году на энергетических объектах России произошло около 200 серьезных аварий, к 1997 году их число достигло 1200, в настоящее время оно продолжает увеличиваться и по прогнозам специалистов в ближайшие годы может резко возрасти из-за оживления промышленности [1].

Существуют два возможных варианта снижения аварийности, вызванной старением оборудования: замена устаревшего оборудования, что в нынешних экономических условиях практически нереально, и проведение комплекса мероприятий, направленных на продление срока службы оборудования вплоть до полной выработки его реального ресурса. Основными элементами названного комплекса мероприятий должны быть периодический или непрерывный контроль основных характеристик и режимов работы оборудования, оценка технического состояния, прогнозирование его изменения, выявление аварийно опасных объектов и обоснование сроков ремонтов.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка и внедрение новых более совершенных способов неразрушающего контроля состояния оборудования на месте его установки, под рабочим напряжением и в условиях влияния электромагнитных помех.

Снижение ресурса высоковольтного оборудования (силовые трансформаторы и автотрансформаторы, кабельные линии) в первую очередь обусловлено старением изоляции.

В число неразрушающих испытаний изоляции высоковольтного оборудования, наряду с широко распространенными измерениями тангенса угла диэлектрических потерь и абсорбционных характеристик, входит определение характеристик частичных разрядов (ЧР). Под ЧР понимается местный разряд на поверхности или внутри изоляции, шунтирующий часть диэлектрика между электродами, находящимися под разными потенциалами. ЧР возникают на участках, обладающих пониженной, по сравнению с остальным объемом изоляции, электрической прочностью, в местах неоднородностей, расслоения или растрескивания изоляции.

Частичные разряды, будучи следствием дефектов изоляционной конструкции, в то же время являются одним из процессов, вызывающих дальнейшее разрушение диэлектриков.

Под действием ЧР начинается разрушение изоляции, размер дефектной области и интенсивность разрядов увеличиваются. Возникновение ЧР сопровождается уменьшением напряжения на электродах объекта, фотоионизацией в объеме газа (свечением), расширением газа в полости с образованием ударной волны и распространением акустических волн в элементах изоляционной конструкции. Указанные эффекты позволяют не только регистрировать частичные разряды, но и измерять их характеристики.

Методы контроля и регистрации ЧР можно разделить на две большие группы: неэлектрические и электрические. Основной отличительной особенностью неэлектрических методов является то, что измеряются эффекты, сопровождающие частичный разряд – акустический шум и свечение.

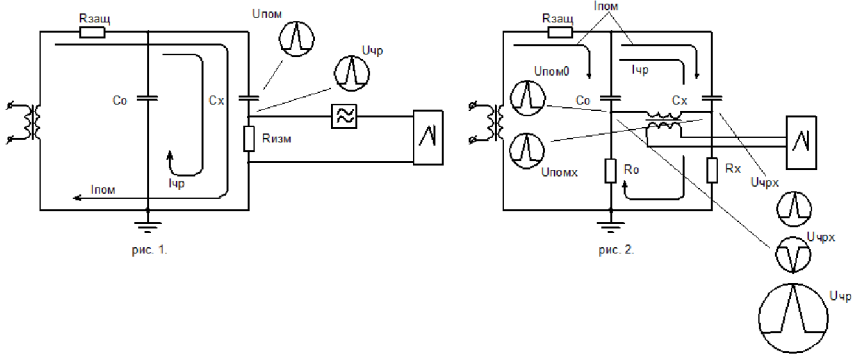
Оптический метод применяется в основном при проведении научных исследований. Он позволяет регистрировать частичные разряды в основном на краях электродов с проводящим прозрачным слоем. Метод обеспечивает высокую чувствительность измерений и помехозащищенность.

Преимуществом акустического метода является регистрация ЧР внутри непрозрачных объектов большой ёмкости. Чувствительность устройств, выполненных с использованием этого метода, зависящая от толщины и звукоизолирующих свойств диэлектрика, ниже, чем у аналогичных устройств, регистрирующих оптические эффекты, но в этом случае обеспечивается возможность регистрации ЧР там, где применение других способов затруднительно.

В отличие от оптических и акустических способов контроля ЧР, точность и достоверность результатов которых существенно зависит от характеристик самого объекта контроля, чувствительность и информатив-

ность электрических методов должна быть выше, так как при их реализации регистрируются электромагнитные возмущения, вызывающие и сопровождающие ЧР в изоляционных конструкциях.

В момент возникновения ЧР (пробоя части изоляции) напряжение на электродах объекта контроля уменьшается, при этом напряжение на соседних участках схемы (на соединительной емкости) остается неизменным (рис. 1). Указанная разность напряжений является причиной формирования импульса тока, дозаряжающего емкость объекта контроля. Ток перезаряда соединительной емкости и объекта пропорционален «кажущемуся» заряду ЧР.



Наибольшие трудности при измерении электрических сигналов ЧР в условиях эксплуатации вызывает выделение сигналов ЧР, возникающих в высоковольтной изоляции контролируемого оборудования из полного спектра электромагнитных колебаний, включающего в себя электромагнитные внутренние и внешние помехи. Так как временные характеристики импульсов токов ЧР лишь незначительно отличаются от импульсов токов, вызываемых помехами, большинство предлагаемых методов идентификации импульсных токов ЧР оказываются недостаточно эффективными.

Наиболее перспективным в плане устранения помех является использование и дальнейшее совершенствование мостовой схемы (рис. 2). Она позволяет избавиться от большинства видов помех, кроме помех, возникающих в контуре заземления. Принцип ослабления сигнала от внешних шумов и помех (главным образом, от помех короны) состоит в следующем: токи от источника помех, проходя на землю через емкости объекта и соединительного конденсатора, создают встречные (синфазные) паде-

ния напряжения на измерительных элементах (R_0 , R_x). В то же время ток частичных разрядов вызывает согласное падение напряжения на измерительных элементах, которое регистрируется измерительным устройством (см. рис. 2).

При использовании для регистрации характеристик ЧР мостовой схемы, импульсы напряжения подводятся к измерительному устройству по двум коаксиальным кабелям. В качестве измерительного устройства используется электронный осциллограф, информация от которого выводится на монитор компьютера. Применение электронного осциллографа позволяет сохранять в памяти компьютера результаты измерения. Обработанная компьютером информация выводится на монитор в виде двух кривых, одна из которых отображает изменение напряжения на измерительном элементе, включенном последовательно с объектом контроля, а вторая – напряжение на измерительном элементе, включаемом в цепь соединительной емкости. При обработке результатов измерений, оператором сравниваются фазовые и временные характеристики ранее записанных в память регистрируемых импульсных сигналов.

Процесс расшифровки диаграмм не может быть программно автоматизирован без существенной потери точности и достоверности измерений. В то же время, использование дополнительных аппаратных средств позволяет существенно упростить задачу оператора.

Одним из возможных аппаратных способов автоматизации измерений является включение импульсного трансформатора в состав мостовой схемы (рис. 2.). В этом случае синфазные импульсы помех не приводят к разбалансировке мостовой схемы, в диагональ которой включен трансформатор, ток по первичной обмотке трансформатора не проходит и ЭДС во вторичной обмотке равна нулю. В то же время противофазные падения напряжения, создаваемые на измерительных элементах импульсными токами ЧР, вызывают прохождение импульсного тока в первичной обмотке трансформатора и, как следствие, возникновение импульсной ЭДС на выходе мостовой схемы измерения.

Разработанная схема в лабораторных условиях позволяет надежно регистрировать ЧР на фоне внешних импульсных помех. Для оценки возможности ее применения в условиях эксплуатации необходимо проведение испытаний схемы на действующем энергообъекте.

Библиографический список

1. **Техническая** диагностика энергетического оборудования: проблемы, тенденции, перспективы. Кириевский Е., Кабель-news, № 9, 2006.

*О.М. Терентьев, д.т.н., проф., А.Й. Клецов, студ.
(Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»)*

АККОМОДАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА КОНВЕЙЕРНЫХ УСТАНОВОК К ПЕРЕМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ УСЛОВИЯМ

Постановка проблемы и связь с практическими задачами. Согласно постановлению Кабинета Министров Украины «Об одобрении Государственной программы развития промышленности» от 28 июля 2003 г. № 1174 [1] и других постановлений и приказов управляющих органов [2–4], повышение эффективности работы подъемно-транспортных единиц целесообразно проводить благодаря регулировке коэффициента сопротивления рабочего органа конвейерного оборудования. Общим недостатком существующих методик расчета подъемно-транспортных систем является использование эмпирических коэффициентов трения скольжения в подшипниках бегунков подъемно-транспортного оборудования [5–7]. В них не учитываются шероховатость и фрикционные параметры подшипников.

Целью исследования является определение функционального коэффициента для усовершенствования существующих методик расчета и математических моделей путем учета фрикционных показателей.

Изложение и обоснование материала исследования. Впервые предложена формула коэффициента сопротивления рабочего органа конвейерной установки с функциональным коэффициентом трения скольжения подшипников бегунков. Она отличается от известных тем, что учитывает фрикционные параметры. Учитывая математические модели, приведенные в [5], установлен коэффициент сопротивления рабочего органа конвейерной установки, учитывающий физико-механические характеристики материалов и фрикционные параметры на функциональном уровне

$$\omega' = k_p \cdot \frac{\left(\frac{2,4 \cdot \tau_o \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sqrt{r}}{V \cdot (V - 1) \cdot K_1 \cdot E \cdot \sqrt{h}} + \beta + \frac{0,4 \cdot \alpha_{эф} \cdot \sqrt{h}}{K_1 \cdot V \cdot (V - 1) \cdot \sqrt{r}} \cdot d + 2\mu_1 \right)}{D_6}, \quad (1)$$

где τ_o , – движущее сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю, Па; β – коэффициент укрепления молекулярной связи, в.

о.; μ – коэффициент Пуассона, в. о.; r – шероховатость поверхности, м; V – параметр аппроксимации начальной части опорной кривой профиля, в. о.; K_1 – константа интегрирования, в. о.; E – модуль упругости, Па; h – величина сближения, м; $\alpha_{эф} = \alpha_r 2,5$ – коэффициент гистерезисных потерь при сложном напряженном состоянии, в. о., [8]; α_r – коэффициент гистерезисных потерь при простом растяжении-сжатии, в. о.; μ_1 – коэффициент трения качения пластмассового обода бегунка по стальным направляющим, м; D_6 – диаметр бегунка, м.

В проведенном тяговом расчете учтены механические параметры барабана, футерованного резиной: шероховатость – 40 мкм, 60 мкм [9], движущее сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю – 0,25 кгс/мм² [8], коэффициент укрепления молекулярной связи – 0,01 [8] и другие. В результате сравнения тяговых расчетов ленточного конвейера с использованием эмпирического коэффициента сопротивления рабочего органа ($\omega' = 0,035$) [5] и предложенного функционального коэффициента, натяжение полотна увеличивается на 2...5 кН с увеличением шероховатости барабана, футерованного резиной, на 20 мкм, а значение функционального коэффициента изменилось на $\omega' = 0,06142$. Это позволяет подбирать оборудование под требования производства и избегать аварийных ситуаций, приводящих к материальным и энергетическим потерям.

Выводы

1. Впервые предложен функциональный коэффициент трения скольжения в подшипниках бегунков для изменения натяжения ленты и коэффициента сопротивления рабочего органа конвейерных установок, в зависимости от условий производства, подбором фрикционных параметров;

2. С повышением шероховатости на 20 мкм, натяжение ленты увеличилось на 2...5 кН, а значение коэффициента сопротивления рабочего оборудования изменилось с 0,035 на 0,061. Увеличение натяжения ленты достигалось футурированием барабана резиной с шероховатостью большего значения (с 20 до 40 мкм).

Библиографический список

1. **Постанова** Кабінету Міністрів України «Про схвалення Державної програми розвитку промисловості» від 28 липня 2003 р. № 1174.
2. **Постанова** Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державної програми будівництва та розвитку мережі метрополітенів на 2006-2010 роки» від 7 березня 2006 р. № 257.
3. **Постанова** Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу» від 28 липня 2004 р. № 967.

4. **Наказ** Міністерства транспорту та зв'язку України «Про затвердження Галузевої програми енергозбереження та впровадження альтернативних видів палива на транспорті на 2006-2010 роки» від 09.02.2006 року. № 114.
5. **Підйомно-транспортні машини**: Розрахунки підймальних і транспортувальних машин [Текст]: Підручник / В.С. Бондарев, О.І. Дубинець, М.П. Колісник та інші. ; під заг. ред. В.В. Тронько. — К.: Вища школа, 2009. — 734 с.: іл. - ISBN 978-966-642-324-8.
6. **Машини** непрерывного транспорта [Текст]: Учебник / Р. Л. Зенков, К. И. Хайлов, А. К. Шевлягин та інші. ; под общ. ред. В. И. Плавинского. — М.: Машиностроение, 1969. — 720 с.
7. **Кузьмин А. В.** Справочник по расчётам механизмов подъёмно-транспортных машин [Текст] : справ. / А. В. Кузьмин, Ф. Л. Марон ; - М. : Вышэйшая школа, 1983. - 352 с. - Библиогр. : с. 141-274.
8. **Трение**, изнашивание и смазка [Текст] : Справ. в 2 кн. / В. В. Алисин, А. Я. Алябьев, А. М. Архаров та інші. ; под общ. ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. 1978. - 400 с.
9. **Общие** технические условия на изделия машиностроения (детали) [Электронный ресурс] / Политех. Белорусский. нац. техн. ун-т, фак. приборостроительный. - Режим доступа : <http://www.support17.com/component/content/308.html?task=view/> - 2009 р. - Загол. с экрана.

И.Ю. Долгих, инж., В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ В ПРОГРАММЕ COMSOL MULTIPHYSICS НА ПРИМЕРЕ ТРАНСФОРМАТОРА КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ

В настоящее время для исследования трансформаторов применяется моделирование в различных компьютерных программах. Использование программы полевого моделирования Comsol Multiphysics открывает широкие возможности для анализа работы трансформаторов. В работе представлена двухмерная модель трансформатора канальной печи [1], питающегося от источника синусоидального напряжения. Сочетание полевой и цепной моделей позволяет в качестве входной величины использовать напряжение, а токи, протекающие в первичной обмотке, являются расчётными величинами.

Геометрия двухмерной модели трансформатора (рис. 1) содержит магнитопровод – 1, первичную обмотку – 2, короткозамкнутый вторичный виток, заменяющий канал с расплавленным металлом – 3, границу расчётной области – 4 и бесконечный элемент – 5, моделирующий открытые границы расчётной области.

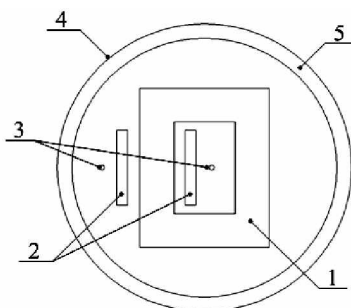


Рис. 1. Геометрия двухмерной модели трансформатора каналной печи

Исходными данными полевой модели трансформатора являются физические свойства материалов: относительная магнитная проницаемость стали сердечника, удельное электрическое сопротивление меди первичной обмотки и короткозамкнутого вторичного витка, а также нулевая электропроводность воздушной среды, окружающей исследуемый трансформатор. Решение краевой задачи подразумевает также задание граничных условий, которые в двухмерной модели лежат на внешней окружности (рис. 1).

Исследования процессов с использованием модели проводились как в режиме холостого хода, при отсутствующем вторичном витке (в этом случае в область, ограничивающую вторичный виток, задаётся нулевая электропроводность), так и с нагрузкой.

В двухмерной модели первичная обмотка (индуктор) представлена двумя частями, и схема замещения в электрическом эквиваленте также представляется двумя частями (рис. 2, а), где часть 1 показана между узлами 1-2, а часть 2 – между узлами 2-0. Аналогичным образом представляется вторичный виток (рис. 2, б).

Электрические связи моделируются в подпрограмме Spice Circuit Editor в соответствии со схемой замещения модели [2].

Взаимосвязь полевой и цепной моделей осуществляется через интегральные уравнения, вычисляющие напряжения на частях первичной обмотки. Интегральные уравнения, вводимые в программу, имеют следующий вид

$$U = \int_S \frac{N \cdot a_m}{S} \cdot (-E) dS, \quad (1)$$

где a_m – параметр, определённый из специально разработанной трёхмерной модели исследуемого трансформатора, который в первом приближении можно принять равным толщине пакета магнитопровода; N – число витков первичной обмотки; S – площадь поперечного сечения обмотки; E – напряжённость электрического поля, которая является результатом полевого расчёта.

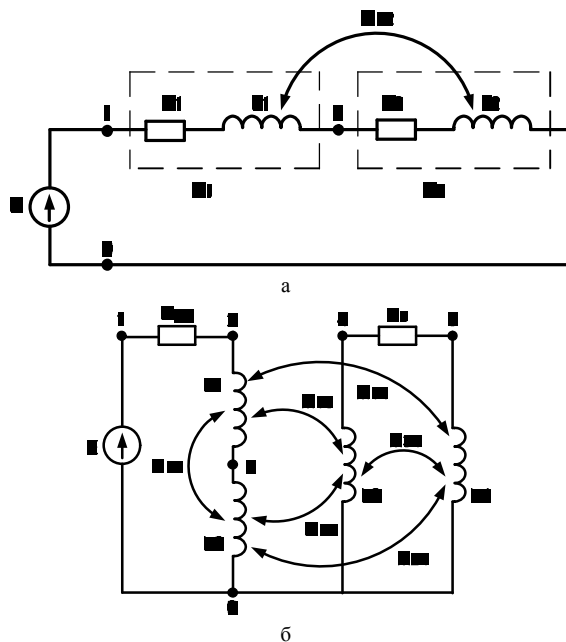


Рис. 2. Цепное представление модели трансформатора

Картины распределения магнитного поля, полученные в модели, в опытах холостого хода и с нагрузкой в виде короткозамкнутого медного вторичного витка, представлены соответственно на рис. 3 и рис. 4.

Выполненные вычислительные эксперименты с использованием совместных расчётов на основе цепной и полевой моделей показали эффективность использования данного метода для исследований процессов в электротехнических и электротехнологических установках.

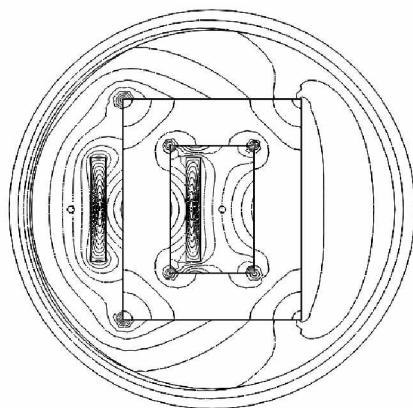


Рис. 3. Магнитное поле в модели (холостой ход)

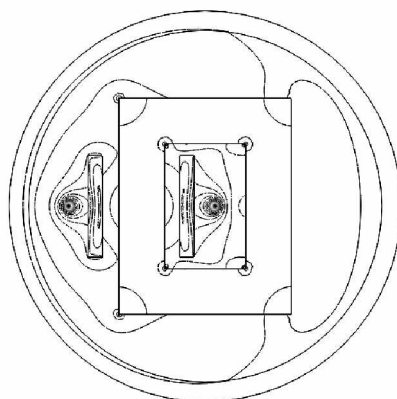


Рис. 4. Магнитное поле в модели (с вторичным витком)

Библиографический список

1. **Установки** индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр / Под. ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
2. **Долгих И.Ю.** Разработка и исследование физической модели канальной печи / Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – Т. 3. – С. 120–123.

Н.А. Морозов, к.т.н., доц., С.А. Нестеров, инж. (ИГЭУ)

ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ МАГНИТОПРОВОДЯЩЕГО КОЛЬЦА В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ

Существуют магнитные системы с ферромагнитными кольцами, расположенными в зазоре между двумя цилиндрами, проводящими магнитный поток. Подобная конструкция используется при создании телескопических систем для передачи вращательного или возвратно-поступательного движения промежуточного цилиндра в какую-либо закрытую камеру, например при вакуумной сварке, сварке в атмосфере специальных газов, плазменном напылении и тому подобное. В качестве уплотнения между цилиндрами может быть использовано магнитожидкостное уплотнение, в котором магнитожидкостная пробка удерживается в зазоре между цилиндрами постоянным магнитным полем. Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой коллоидную систему нанодисперсного магнетита железа, покрытого поверхностно-активным веществом в жидкости-носителе, например керосине, полиэтилсилоксане и т.п. Обладая магнитными свойствами и текучестью, нанодисперсные магнитные жидкости открывают новые возможности в разработке электромеханических устройств.

В электромеханических устройствах с цилиндрической магнитной системой возникает задача оценки возникающих сил одностороннего магнитного тяжения, причиной возникновения которых является асимметрия распределения магнитного потока. Проявление сил одностороннего магнитного тяжения в одинарном цилиндрическом зазоре, заполненном МЖ рассмотрено в [1]. При смещении ферромагнитного кольца относительно оси краевых цилиндров, возникает перераспределение магнитного потока в зазоре и появляется асимметрия магнитного поля, вследствие чего возникают силы одностороннего магнитного тяжения, действующие на кольцо. Распределение магнитного потока при эксцентриситете кольца носит сложный характер, влияет на силы одностороннего тяжения, величину магнитной индукции в зазоре и другие параметры устройства, поэтому его анализ актуален.

Распределение магнитного поля в зазоре с подвижным магнитопроводящим элементом было смоделировано в среде ANSYS. При отсутствии аналитических выражений, позволяющих достаточно точно посчитать магнитную цепь со смещённым кольцом, именно моделирование даёт

наиболее полное теоретическое представление о процессах, происходящих в системе.

Для исследования была создана трёхмерная модель магнитной системы (рис. 1). Выбор именно трёхмерного моделирования, несмотря на высокие требования к возможностям компьютера и возрастающее в несколько раз время расчёта, обусловлено невозможностью создания требуемой модели в двухмерной постановке.

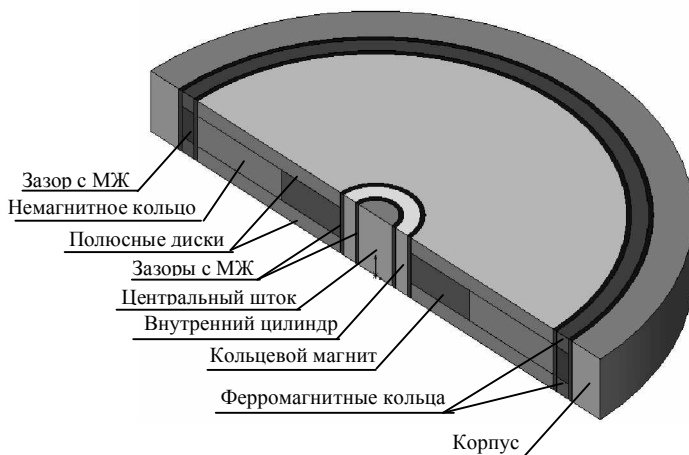


Рис. 1. Эскиз используемой модели

Используемая для расчётов модель состоит из ферромагнитного корпуса и полюсных дисков, между которыми размещается кольцевой постоянный магнит и немагнитное кольцо. Зазор, образующийся между дисками и корпусом, заполнен МЖ и в нём располагаются ферромагнитные кольца. На оси магнитной системы находится центральный магнитопроводящий шток и немагнитный цилиндр. Зазоры между ними так же заполнены МЖ. Для ферромагнитных элементов задавалась кривая намагничивания, соответствующая Ст 3. Кривая намагничивания МЖ (С2-40М) и постоянных магнитов (феррит бария 18БА220) так же были предварительно заданы. Модели с эксцентриситетом создавались радиальным смещением оси ферромагнитных колец относительно оси корпуса и полюсных дисков. Для проверки адекватности результатов моделирования была рассчитана схем замещения, составленная для случая симметричного расположения кольца и полюсов. Расхождение результатов

расчёта и моделирования при симметричном положении кольца не превышало 3,6 %.

В данной работе проводится оценка влияния на силы одностороннего магнитного тяжения значений зазоров, соотношения толщины кольца и зазоров, магнитной проницаемости МЖ, магнитной проницаемости и степени насыщения кольца. Необходимо провести также анализ перераспределения магнитного поля, возникающего при эксцентриситете подвижного кольца. Исследование выполняется для ферромагнитных колец толщиной 5 мм, при зазорах между полюсами, кольцами и корпусом 1, 1,5 и 2 мм. Тогда зазор между полюсами и корпусом составляет соответственно 7, 8 и 9 мм. На рис. 2 представлены зависимости радиальной силы тяжения от эксцентриситета кольца, его магнитных свойств и наличия или отсутствия МЖ в зазоре системы.

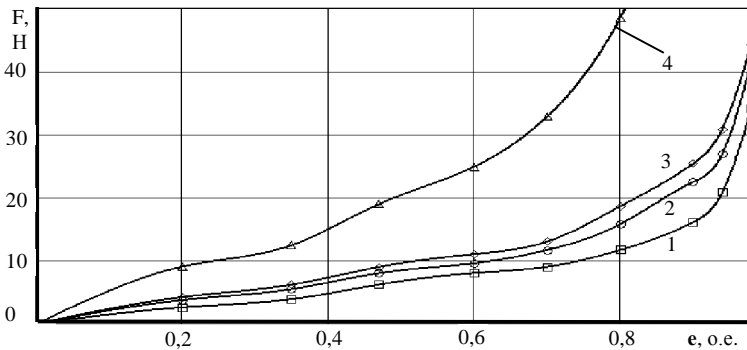


Рис. 2. Кривые радиальной силы тяжения:

1 – кольцо из Ст3, без МЖ в зазоре; 2 – кольцо из Ст3, МЖ в зазоре; 3 – магнитная проницаемость кольца равна начальной, МЖ в зазоре; 4 – магнитная проницаемость кольца стремится к бесконечной, МЖ в зазоре

Из полученных кривых видно, что увеличение эксцентриситета ведёт к росту силы магнитного тяжения. При относительном эксцентриситете меньше 0,7 зависимость силы от эксцентриситета практически линейна. Эксцентриситет больше 0,8 ведёт к резкому возрастанию сил тяжения. При значении относительной магнитной проницаемости подвижного кольца много больше, чем у Ст3, силы тяжения более чем в два раза превышают усилия тяжения для реального материала. Наличие магнитных свойств у МЖ в зазоре увеличивает силу тяжения на 20÷30 %. Общий характер изменения кривых остаётся прежним.

Таким образом, при эксцентриситете менее 0,6 сила одностороннего тяжения колец из конструкционной стали не превышает 10 Н для принятых размеров системы. При уменьшении эксцентриситета усилие тяжения линейно снижается до нуля.

Результаты моделирования смещения подвижного элемента, при неизменной его толщине и переменных зазорах, представлены на рис. 3. Здесь принято, что толщина подвижного элемента a равна 5 мм и остаётся неизменной, а зазор δ между подвижными и неподвижными поверхностями составляет 1, 1,5 и 2 мм с каждой стороны от подвижного элемента. Значение общей величины рабочего зазора Δ между полюсами и корпусом определялось как, $\Delta = a + 2\delta$. Из кривых видно, что независимо от величины зазора, между перемещающимися и неподвижными поверхностями, силы одностороннего тяжения зависят только от значения относительного эксцентриситета и практически совпадают друг с другом. Это можно объяснить одинаковым влиянием эксцентриситета на изменение магнитной проводимости системы при разных значениях зазора. При этом уменьшение зазора ведёт к линейному уменьшению намагничивающей силы постоянного магнита.

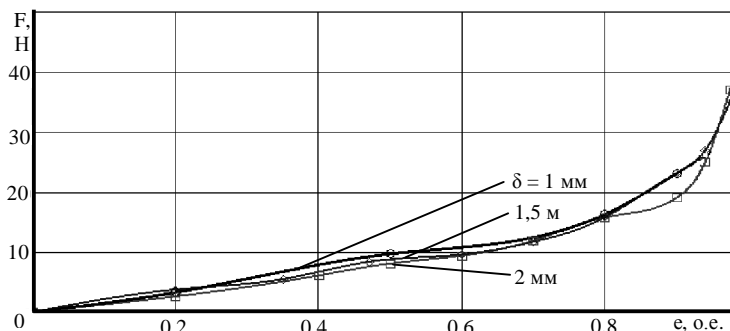


Рис. 3. Кривые силы тяжения с при переменных зазорах δ

Результаты моделирования показывают, что сила магнитного тяжения мало зависит от толщины кольца, а определяющими являются значение относительного эксцентриситета и соотношение между толщиной ферромагнитного кольца a и полным зазором Δ , что объясняется малым насыщением магнитной цепи при использовании постоянных магнитов и относительно больших значениях результирующего рабочего зазора, не менее 2 мм. Уменьшение отношения a/Δ от 0,66 до 0,33 ведёт к пропорциональному уменьшению силы тяжения.

На рис. 4 и 5 представлены картины распределения магнитного поля в дисковой системе в осевом и радиальном сечениях. При отсутствии эксцентриситета распределение магнитного потока симметричное, значения магнитной индукции не превышают 0,9 Тл, а в области рабочего зазора составляют 0,1÷0,2 Тл. Магнитный поток при отсутствии смещения кольца распределяется в зазоре симметрично и проходит из диска через МЖ в кольцо и далее через следующий зазор с МЖ в корпус системы в радиальном направлении.

Смещение подвижного элемента в радиальном направлении приводит к перераспределению магнитного поля во всей магнитной системе, что видно на рис. 6.

Сдвиг кольца вызывает изменение зазоров: уменьшение его с одной стороны подвижного кольца и увеличение с другой стороны. В диаметрально противоположной точке кольца это изменение зазоров происходит в обратном порядке.

В результате получаем более сложные пути прохождения магнитного потока, который из диска через зазор с МЖ переходит в кольцо, проходит часть пути по кольцу в азимутальном направлении и затем через заполненный МЖ зазор, но уже другой величины, переходит в корпус системы.

Исследования показывают, что наибольшее изменение магнитной индукции наблюдается в подвижном кольце в сечениях, расположенных почти под углом 90° к линии смещения. Однако наибольшее насыщение симметрично сдвигается в сторону, обратную смещению кольца (рис. 7). Это объясняется заметным ростом магнитной индукции в кольце и, следовательно, увеличением магнитного потока между кольцом и внутренней частью корпуса при значениях угловой координаты близких к 90° , точка 1. В результате величина магнитного потока и индукции в последующих сечениях кольца становится меньше.

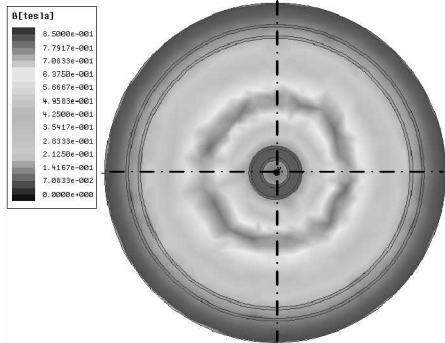


Рис. 4. Распределения магнитного поля в осевом сечении



Рис. 5. Распределения магнитного поля в радиальном сечении

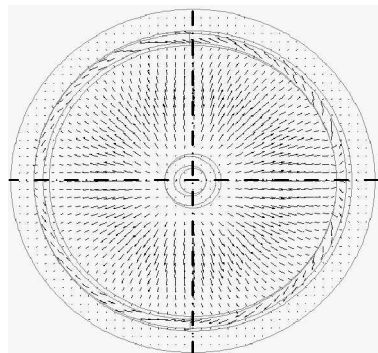


Рис. 6. Перераспределение магнитного потока при эксцентриситете кольца

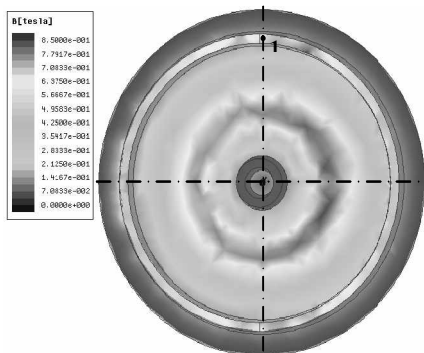


Рис. 7. Перераспределение магнитного поля при палиальном смещении кольца

Следует ожидать, что уменьшение толщины кольца приведёт к увеличению магнитной индукции в области точки 1 и более заметному перераспределению потока в зазоре системы. Тогда влияние эксцентриситета на силу одностороннего тяжения будет проявляться при малых эксцентриситетах в той же степени, как в рассмотренных выше случаях, а при больших его значениях в меньшей степени из-за насыщения подвижного кольца. Увеличение намагничивающей силы и магнитного потока всей системы приведёт к большему насыщению кольца и меньшему влиянию эксцентриситета на силу одностороннего магнитного тяжения.

Таким образом, проведённое моделирование показало заметное влияние размеров и эксцентриситета ферромагнитного подвижного кольца в заполненном МЖ зазоре цилиндрической магнитной системы на распределение магнитного поля в нём и на величину силы одностороннего магнитного тяжения, действующего на подвижное кольцо.

Библиографический список

1. Радчук А.В. Применение нанодисперсной магнитной жидкости в прямоходовых демпфирующих устройствах. / А.В. Радчук, Н.А. Сабанеев, Н.А. Морозов. – Избранные труды, XXI Международная инновационно-ориентированная конференция «МИКМУС-2009», 16-18 ноября 2009, ИМАШ РАН, – М.: ИМАШ РАН, 2010.

М.С. Сайкин, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

ГЕРМЕТИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ НАНОЖИДКОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для получения высококачественных сварных соединений, а также сплавов металлов предназначенных для специальных условий эксплуатации применяют вакуумные технологии. Например, применение диффузионной сварки в вакууме позволяет получить герметичные неразъемные соединения материалов с большим различием температур плавления. Использование вакуумной плавки металлов освобождает их от растворённых газов, что придаёт им высокие механические свойства. Особые требования по герметичности объёма предъявляются к сварочным камерам электромеханического комплекса электронно-лучевой сварки, в которых степень вакуума достигает $10^{-6} \div 10^{-7}$ Па. Традиционные типы уплотнений [1] не обеспечивают заданных условий эксплуатации. Таким техническим требованиям удовлетворяют герметизаторы на основе магнитной наножидкости (МНЖГ).

Основными преимуществами МНЖГ перед традиционными уплотнениями является практически абсолютная герметичность, малый собственный момент трения, отсутствие износа, высокая долговечность и простота технического обслуживания. МНЖГ надёжно эксплуатируются при вибрациях и ударах, обладают высокой радиационной стойкостью.

Принцип действия МНЖГ (рис. 1) состоит в удержании магнитной наножидкости (МНЖ) 1 в рабочем зазоре δ , образованном между поверхностью вала 2 и полюсными приставками 3, к внутренним торцевым поверхностям которых примыкает постоянный магнит 4.

МНЖ 1 удерживается в рабочем зазоре δ , пондеромоторной силой, которая возникает при взаимодействии магнитного момента единичного объёма МНЖ с неоднородным магнитным полем [2, 3].

Действие неоднородного магнитного поля на МНЖ вызывает её перераспределение более чем в 3 раза [4]. Время расслоения зависит от её свойств и параметров магнитного поля. Поэтому условием сохранения работоспособности МНЖ в рабочем зазоре является допустимая величина магнитной индукции и градиента.

Для создания неоднородного магнитного поля в рабочем зазоре δ на валу 2 или цилиндрических полюсных приставках 3 выполнены зубцы.

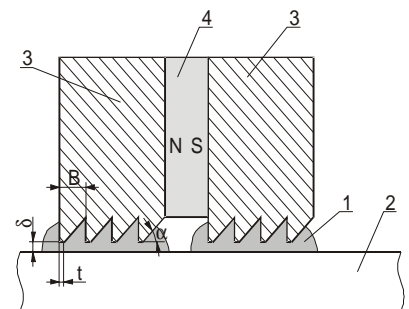


Рис. 1. Конструкция МНЖГ

В качестве источника магнитного поля используются постоянные магниты 4, изготовленные из «закритических» материалов. Они обладают высокой стабильностью своих свойств, что обеспечивает неизменность их магнитных характеристик при вибрациях, ударах, действии сторонних тепловых и магнитных полей [5, 6]. Применение таких магнитов в МНЖГ обеспечивает постоянство магнитной индукции в рабочем зазоре и, как следствие, перепада давлений.

Части магнитопровода изготовлены из углеродистых сталей, имеющих высокую индукцию магнитного насыщения $1,9 \div 2,1$ Тл, или коррозионно-стойких сталей типа 20Х13, у которых она составляет $1,78$ Тл [7].

Для герметизации валов и стыков электротехнологического оборудования разработаны МНЖГ с увеличенным ресурсом работы. Для повышения ресурса работы в конструкциях МНЖГ предусмотрена возможность регулирования магнитной индукции в рабочих зазорах. Снижение магнитной индукции приводит к уменьшению расслоения МНЖ. Это позволяет выбирать её значение в зависимости от условий эксплуатации, что важно при хранении МНЖГ и повторно-кратковременных режимах работы.

На рис. 2 представлена конструкция МНЖГ предназначенного для герметизации валов диаметром до 1500 мм и скоростью вращения до 1 м/с [8]. МНЖГ состоит из магнитного узла в виде постоянного магнита 1 с полюсными наконечниками 2 и 3, заключённого в обойму 4, установленного на немагнитном валу 5, и магнитопровода в виде самоустанавливающихся колец 6 и 7 в магнитном корпусе 8, охватывающих торцевые поверхности полюсных наконечников. Между полюсными наконечниками и самоустанавливающимися кольцами находятся качения 9, которые опираются на вкладыши 10–13, выполненные из немагнитного материала

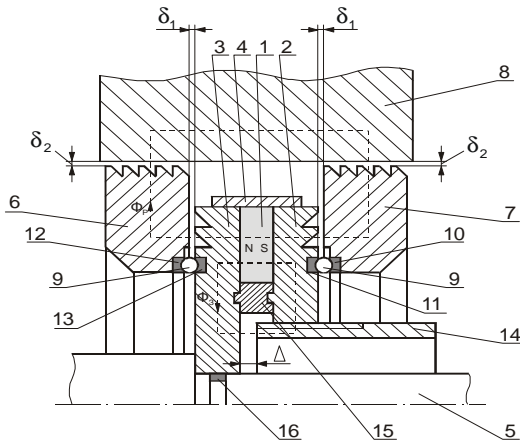


Рис. 2. МНЖГ больших диаметров вала

и закалённые до твёрдости, близкой к твёрдости тел качения. МНЖГ имеет регулировочный элемент в форме кольца 14, изготовленный из магнитопроводного материала с возможностью перемещения по резьбе, выполненной на внутренней цилиндрической поверхности кольца 7. Кольца 6 и 7 жёстко соединены между собой немагнитной втулкой 15. Между полюсным наконечником 3 и валом 5 установлено статическое уплотнительное кольцо 16.

Перед началом работы МНЖГ производят сборку и заправку магнитной жидкостью радиальных δ_1 и торцевых δ_2 рабочих зазоров. Рабочий поток Φ_p проходит по пути постоянный магнит 1, полюсный наконечник 3, торцевой зазор δ_2 , магнитопроводное кольцо 6, радиальный зазор δ_1 , магнитопроводный корпус 8, другой радиальный зазор δ_1 , магнитопроводное кольцо 7, другой торцевой зазор δ_2 , полюсный наконечник 2, постоянный магнит 1. Постоянный магнит создаёт магнитное поле в радиальных и торцевых рабочих зазорах, которое удерживает в них МНЖ и обеспечивает их герметичность. После сборки МНЖГ регулируют его перепад давлений на испытательном стенде. При этом создаётся перепад давлений, превышающий рабочий перепад давлений в 1,2–1,5 раза. В том случае, если удерживаемый перепад давлений больше рабочего, с учётом коэффициента запаса, регулировочный элемент 14 перемещается по резьбе, выполненной на внутренней цилиндрической поверхности кольца 7. При этом уменьшается зазор Δ и появляется магнитный поток Φ_s , кото-

рый проходит по пути постоянный магнит 1, полюсный наконечник 3, регулировочный элемент 14, полюсный наконечник 2, постоянный магнит 1. Это приводит к уменьшению рабочего потока в рабочих зазорах δ_1 и δ_2 , что вызывает уменьшение удерживаемого перепада давлений МНЖГ. Регулировочный элемент 14 перемещается по резьбе до тех пор, пока уменьшение зазора Δ не приведёт к появлению течи через рабочие зазоры δ_1 и δ_2 выше допустимой. После этого перепад давлений с уплотнения снимают и оно готово к работе.

Такая регулировка позволяет настроить серию уплотнений на требуемый перепад давлений.

На рис. 3 представлена конструкция статического МНЖГ [9]. МНЖГ состоит из магнитного узла, включающего постоянный магнит 1, неподвижный полюс 2 и составной полюс, из неподвижной 3 и подвижной 4 частей. Неподвижный полюс 2 и неподвижная часть 3 составного полюса жёстко соединены друг с другом с помощью кольца 5, изготовленного из немагнитопроводного материала. Соединение осуществляется с помощью сварки, после которой производится механическая обработка узла, состоящего из деталей 2, 3, 5. Внутренние цилиндрические размеры кольца 5 выполняются таким образом, чтобы монтаж на корпус герметизируемого объёма 6 не вызывал затруднений. На внутренней цилиндрической поверхности неподвижной части составного полюса 3 выполнена резьба, куда входит его подвижная часть 4. Поворот подвижной части 4 осуществляется с помощью винта 7.

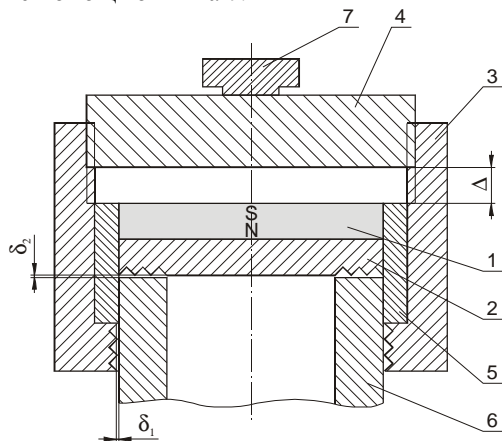


Рис. 3. Статический МНЖГ

При установке статического МНЖГ на корпус герметизируемого объёма 6 подвижная часть 4 составного полюса занимает такое положение, при котором величина зазора Δ с постоянным магнитом 1 значительна. При этом основная часть магнитного потока, созданного постоянным магнитом 1, рассеивается. Это приводит к значительному снижению силы магнитного притяжения между магнитным узлом МНЖГ и герметизируемым объёмом. После установки МНЖГ на герметизируемый объём 6 зазор Δ уменьшается до 0. При этом магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, замыкается по пути: постоянный магнит 1, неподвижный полюс 2, корпус герметизируемого объёма 6, неподвижная часть 3 и подвижная часть 4 составного полюса, постоянный магнит 1. Рабочие зазоры δ_1 , δ_2 заполнены магнитной жидкостью, которая удерживается полем постоянного магнита и создаёт барьер для удержания перепада давлений.

При демонтаже предлагаемого устройства подвижная часть 4 составного полюса приводится во вращение и образует зазор Δ . Чем больше величина зазора Δ , тем меньше сила магнитного притяжения магнитного узла МНЖГ к корпусу герметизируемого объёма 6. При минимальной величине этой силы производится демонтаж МНЖГ.

Библиографический список

1. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. / Кондаков Л.А., Голубев А.И., Кондакова А.А. – М.: Машиностроение, 1986. – 484 с.
2. Фертман В.Е. Магнитные жидкости. Справочное пособие. – Мн.: Высшая школа, 1988. – 184 с.
3. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
4. Казаков Ю.Б., Сайкин М.С., Щелькалов Ю.Я. Учёт перераспределения магнитных частиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле герметизатора. / Электротехника, №12, 2003. – С. 20-24.
5. Постоянные магниты. Справочник. / Под. ред. д.т.н., проф. Пятина Ю.М. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
6. Сайкин М.С. Особенности выбора постоянных магнитов для магнитожидкостных герметизаторов технологического оборудования. / Вестник научно-промышленного общества. – М.: Изд-во «АЛЕВ-В». Вып. 7. 2004. С. 15-19.
7. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 176 с.
8. Баусов А.М., Сайкин М.С. Магнитожидкостное уплотнение. Свидетельство на полезную модель, Российская Федерация № 20561, МКИ F16J 15/46, Приоритет от 15.05.2001, опубл. 10.11.2001, Бюл. № 31.
9. Сайкин М.С. Торцовое магнитожидкостное уплотнение. Патент на полезную модель, Российская Федерация № 30175, МКИ F16J 15/40, Приоритет от 20.01.2003, опубл. 20.06.2003, Бюл. № 17.

С.В. Балдов, ст. преп., А.А. Шульпин, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Основным ресурсом экономического роста России до 2030 года должно стать повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов [1].

Разработка конкретных мероприятий по экономии электрической энергии и повышению эффективности её использования возможно лишь после выявления мест нерационального расхода электрической энергии. При этом важным является получение максимального экономического эффекта при минимальных затратах на проведение работ по выявлению мест нерационального использования электрической энергии, разработке мероприятий по энергосбережению, а также их внедрению.

Алгоритм проведения работ по выявлению мест нерационального расхода (перерасхода) электрической энергии приведен на рис. 1.

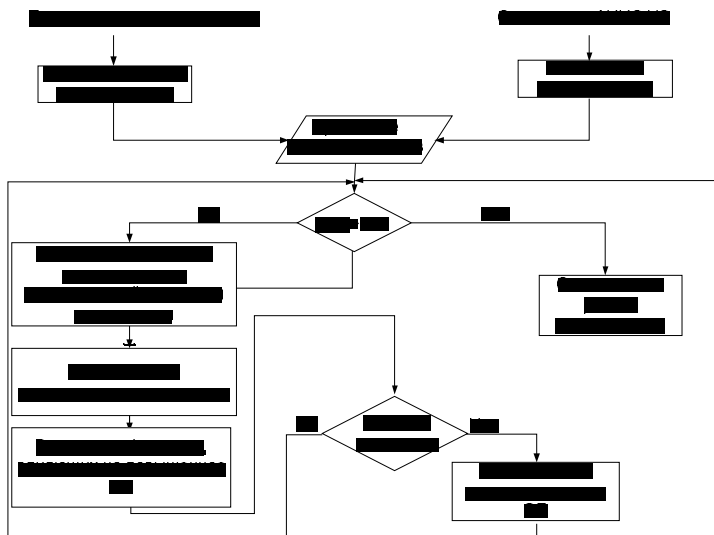


Рис. 1. Алгоритм проведения работ по выявлению мест нерационального расхода электрической энергии

Как видно из приведенного алгоритма одним из ключевых моментов при выявлении мест нерационального расхода является определение норм расхода электрической энергии (составление нормализованных балансов) для каждого структурного подразделения, иерархического уровня с разбивкой по статьям расходов (технология, освещение, вентиляция, потери, прочее).

Для текстильных предприятий определение норм расхода электроэнергии осложняется тем, что их величина зависит не только от параметров заправки и ассортимента продукции, но и от технического состояния оборудования. Для устаревшего оборудования текстильных предприятий это особенно важно, поскольку изношено все: и электрическая, и механическая части [2]. В этих условиях определение норм расхода электроэнергии позволяет решить задачи контроля эффективности использования электроэнергии на каждой технологической операции, выполняемой отдельным оборудованием, и оценки эффективности работы по энергосбережению на всех уровнях технологического процесса производства при условии организации оперативного учета электропотребления.

Проведенные исследования показали, что оптимальным является составление нормализованных электробалансов для каждой рабочей смены. Данные по выработке, времени работы и другим показателям работы оборудования даются на конец работы смены, что позволяет использовать их для составления нормализованных электробалансов без дополнительных трудозатрат.

Увеличение периода составления нормализованных электробалансов приводит к снижению эффективности проведения мероприятий по повышению эффективности электропотребления из-за увеличения различных независимых факторов, влияющих на электропотребление. Уменьшение интервала составления нормализованных электробалансов приводит к существенному увеличению объема обрабатываемой информации, что в свою очередь вызывает большие издержки на получение и обработку исходной информации.

Ранее для составления нормализованных балансов использовались временные отраслевые нормы [3, 4]. Однако их применение в современных условиях затрудняется следующими факторами:

- нормы устарели и не могут быть распространены на вновь устанавливаемое оборудование;
- в настоящее время ряд операций по обработке и выпуску тканей и пряжи могут отсутствовать;
- отсутствует возможность выделения расходов на вентиляцию и освещение;

- схема электроснабжения и система учета в ряде случаев не позволяют разделять электропотребление по различным подразделениям, а также статьям расхода;

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

Исходя из всего вышесказанного, разработана методика составления нормализованных балансов на различных ступенях иерархической структуры текстильного предприятия. Основные особенности данной методики следующие:

- нормы определяются отдельно по статьям расходов: технология, вентиляция, освещение, субабоненты, потери электроэнергии;

- нормы определяются для каждого уровня иерархической структуры предприятия;

- нормы определяются в именованных единицах (кВт·ч), что позволяет учесть фактическое время работы технологического оборудования, в том числе и на холостом ходу;

- в качестве периода нормирования рассматривается рабочая смена.

Использование норм расхода электрической энергии при предлагаемом подходе позволяет проводить работы по выявлению мест нерационального использования электрической энергии и разработке мероприятий по повышению эффективности её использования при минимальных материальных и трудовых затратах. При этом данный подход может быть распространен на другие промышленные предприятия.

Библиографический список

1. **Указ Президента РФ** от 04.06.2008 №889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики».
2. **О стратегии** развития Ивановской области до 2010 года. Распоряжение от 8 августа 2002 года N 982 – р, г. Иваново.
3. **Основные** положения по нормированию расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве. М.: Атомиздат. 1980.
4. **Методические** указания по нормированию расхода тепловой и электрической энергии на предприятиях легкой промышленности. М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1984.

С.Ю. Токарев, асп., В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ СТАНДАРТА «ИЕС 61850» УСПЕХОВ, ДОСТИГНУТЫХ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ

Современные задачи электроэнергетики ставят высокие требования к адекватности представления моделей многопроводных линий. Особенно остро этот вопрос возникает при использовании волновых алгоритмов.

Действительно, использование волновых алгоритмов предполагает конечную скорость распространения волн. Для этого необходимо использование модели с распределенными параметрами. В этом случае, параметры всех трех сред распространения (проводов, воздуха и земли [10]) многопроводной системы должны задаваться максимально точно для каждой частотной составляющей [9].

Результатом определения параметров данной частотной составляющей такой системы будут две симметрические комплексные матрицы – продольного сопротивления (Z) и поперечной проводимости (Y). Из этих данных с помощью модальной декомпозиции [1] определяются постоянные распространения. В n -проводной среде их будет n . При этом они будут независимы друг от друга и, в общем случае, различны. Информация об их величине позволит оценивать скорость распространения волн в рассматриваемой системе. А это, в свою очередь, позволит, например, производить суждение о месте коммутационного воздействия в рассматриваемой системе.

Очевидно, более чем рациональным действием было бы использование обозначенных выше моделей многопроводных линий в рамках существующих на современном этапе развития электроэнергетики тенденций.

В последние десятилетия наблюдается процесс стремительного развития в области вычислительной техники и, связанное с ним, развитие сетевых технологий. По сравнению с предыдущими десятилетиями, значительно удешевляется стоимость аппаратной части реализации [2]. Этот процесс не обошел стороной и электроэнергетику.

Действительно, для применяемых в электроэнергетике устройств (РЗиА, АИИС КУЭ, АСКУЭ) требуется передача огромного количества сигналов. Краеугольным камнем здесь выступает не столько объем передаваемой информации, а сама возможность взаимодействия различных устройств между собой. Мало того, что эти устройства работают по раз-

личным протоколам связи, они не имеют унифицированного представления передаваемой информации. Для организации их надлежащего взаимодействия, управления и снятия с них данных требуются километры медных проводов [3].

Для преодоления этих трудностей «Технический комитет 57» организации «Международная Электротехническая Комиссия» разработал серию стандартов «61850» – «Сети и системы связи на подстанциях». Сюда входят 14 документов, объединенных в 10 глав. В настоящее время значительная часть документов этой серии уже доработана и переиздана – во второй редакции – {ed2.0}.

Отличительной особенностью стандарта стало введение высокой степени абстракции не только в протокольной части, но и, самое главное, в модельном представлении данных [2]. Таким образом, к производителям электроэнергетического оборудования, заявившим поддержку данного стандарта, выдвигаются требования формализации данных в виде абстрактных информационных моделей – так называемых логических узлов [5, п. 5.3].

Эти логические узлы определены в рамках объектно-ориентированного представления. Т.е. в виде классов [8, п. 5], их полей [7, п. 7] и методов [6]. Стандарт определяет более ста логических узлов, описывающих наиболее часто используемые модели подстанционного и фидерного оборудования.

Проанализируем возможность описания применимых для волновых алгоритмов моделей многопроводных линий в рамках концепции стандарта «IEC 61850».

Для информационного представления воздушных линий электропередач согласно стандарту [4, п. 11.5], предлагается использовать логический узел – «ZLIN» [8, п. 5.18.10]. Причем, согласно первому изданию стандарта {ed1.0}, узел фактически не имел практически значащих информационных параметров (уставок). Эти параметры появились лишь во втором издании {ed2.0}.

Логический узел описывает трехпроводную ($n = 3$) линию с сосредоточенными параметрами в симметричной системе координат с учетом влияния взаимоиндукции с соседней цепью.

Использование метода симметричных составляющих в случае точного представления трехпроводных линий недопустимо. Это вызвано тем, что этот метод применим только для идеально транспонированных линий. Для нетранспонированных линий, за счет взаимного влияния последовательностей, будут появляться чисто методологические погрешности.

Некоторым сдерживающим фактором для применения рассматриваемого узла в волновых алгоритмах является использование модели линии с сосредоточенными, а не распределенными параметрами. Однако если реальное устройство, размещающее в себе узел «ZLIN», алгоритмически поддерживает учет частотной зависимости, то возможно применять специальные меры.

Например, для каждой частотной составляющей в наследуемый всеми логическими узлами класс «Common LN» [8, п.5.3.3], в поле «Mod» в атрибуте «d» [7, п.7.5.5] вписывать значение частоты, а с помощью метода «ctlVal» этого атрибута – осуществлять переключение между частотными составляющими.

Однако и такое действие будет недостаточным для использования волновых алгоритмов.

Действительно, помимо продольного сопротивления (Z) линия имеет еще и поперечную проводимость (Y). Узел не имеет такого параметра вообще. Результатом является невозможность (даже при допущении, что линия идеально транспонированная) рассчитать (на базе аппаратной части реализации) скорости распространения в волновых каналах [1].

Линия по своей природе неоднородна. Она, например, может иметь различные типы опор (влияние на $Z_{\text{внешнее}}$) или проходить через участки с различными параметрами грунта (влияние на $Z_{\text{земли}}$). Во всех этих случаях, при достижении волной места неоднородности, будут возникать явления отражения и преломления. Кроме того, скорость распространения волн на этих участках будут иметь иные показатели. В таких случаях методологически [8, п. 5.11.1] линия должна быть разбита на несколько однородных зон. Т.е. фактически на несколько логических узлов «ZLIN».

Очевидно, что большой запас логических узлов [8, п. 5] предоставляет достаточно гибкие возможности. Однако, как показывает практика, даже такого количества не хватает для информационного описания новых разработок в электроэнергетике. Во вновь издаваемых редакциях стандарта количество логических узлов увеличивается. А уже имеющиеся – пересматриваются и дорабатываются. Примером этому может выступать опубликованная в недавнее время вторая редакция {ed2.0}, главы 7 [5–8].

Вселяет надежду то, что, возможно, в третьем издании {ed3.0} все же будет идеологически реализована поддержка зависимости логического узла «ZLIN» от частоты. Например, таким же образом как это было сделано во второй редакции {ed2.0}, введением возможности параметрического задания время-токовых кривых с помощью атрибута «pointZ» поля «CSG» [7, 7.7.4].

Действительно, с точки зрения точного представления многопроводных линий логический узел «ZLIN» все еще требует доработки. В него, как минимум, необходимо ввести учет продольной проводимости (Y). С учетом такой доработки, предельная методологическая точность была бы достигнута, если бы линия задавалась не в симметричных координатах, а своими геометрическими параметрами и физическими параметрами сред распространения. В этом случае можно было бы применять (на базе вычислительных средств аппаратной части решения) метод волновых каналов для непосредственного расчета параметров распространения системы. Кроме того, модернизация логического узла в этом направлении открывала бы перспективы для аппаратного применения метода конечных элементов.

Отметим, что в стандарте заложен некий механизм описания пользовательских узлов [5, п. 14]. Однако движение в этом направлении видится в значительной степени нивелирующим вносимые стандартизацией преимущества.

Библиографический список

1. **Brandão Faria J.A.** Multiconductor transmission line structures: Modal analysis techniques, Wiley, New York, 1993.
2. **Mackiewicz R.E.** Overview of IEC 61850 and Benefits, in Proc. IEEE PSCE, Oct./Nov., pp. 623-630, 2006.
3. **Osanzoy C.** Modelling and Object Oriented Implementation of IEC 61850, 280 p., Lambert Academic Publishing, 2010.
4. **ТС-57.** Communication networks and systems in substations – Part 5: Basic communication structure– Communication requirements for functions and device models. Standard 61850-5, edition 1.0, IEC, 2003.
5. **ТС-57.** Communication networks and systems in substations – Part 7-1: Basic communication structure– Principles and models. Standard 61850-7-1, edition 2.0, IEC, 2011.
6. **ТС-57.** Communication networks and systems in substations – Part 7-2: Basic information and communication structure – Abstract Communication Service Interface (ACSI). Standard 61850-7-2, edition 2.0, IEC, 2010.
7. **ТС-57.** Communication networks and systems in substations – Part 7-3: Basic communication structure– Common Data Classes (CDC). Standard 61850-7-3, edition 2.0, IEC, 2010.
8. **ТС-57.** Communication networks and systems in substations – Part 7-4: Basic communication structure– Compatible logical node classes and data object classes. Standard 61850-7-4, edition 2.0, IEC, 2010.
9. **Токарев С.Ю., Кадников С.Н.** Моделирование процесса распределения электромагнитных волн вдоль линии электропередачи // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов XVI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3 томах. Т.3. – М.: МЭИ, 25-26 февраля 2010. с. 526-527.
10. **Токарев С.Ю., Лебедев В.Д.** Анализ методов определения первичных параметров ЛЭП с учетом влияния земли // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов XVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3 томах. Т.3. – М.: МЭИ, 24-25 февраля 2011. с. 372-373.

В.Н. Гречухин, к.т.н., доц., В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В решении задач коммерческого учёта электроэнергии в рамках АИ-ИС КУЭ важное место занимают вопросы метрологии первичных преобразователей тока и напряжения и их цепей. Суммарная погрешность измерений при использовании стандартных трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН) складывается из составляющих в соответствии с IEC 60044-8, как представлено на рис. 1, а именно собственно погрешности ТТ и ТН, на которые влияют как конструктивные особенности, так и режимы работы (уровни первичных токов и напряжений и параметры нагрузки), кроме того падение напряжения на медных кабелях вторичных систем также увеличивает погрешность.

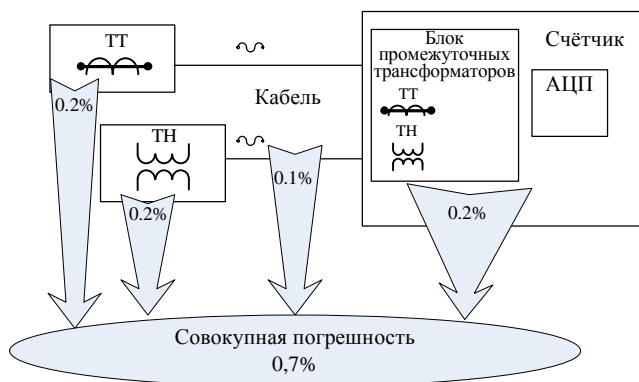


Рис. 1. Распределение погрешностей в измерительной системе с традиционными измерительными трансформаторами

На входе современных цифровых счётчиков устанавливаются промежуточные трансформаторы, которые также вносят свой вклад в суммарную погрешность. В результате при использовании первичных преобразователей класса 0,2 и соблюдении норм по нагрузке преобразователей

суммарная погрешность достигает 0,7 %, но достаточно часто из-за перегрузки вторичных цепей погрешности достигают и превосходят 2 %.

Практический интерес представляет разработка цифровых трансформаторов тока и напряжения [1–3]. Передача информации от цифрового трансформатора передаётся по оптоволокну в виде цифрового сигнала и не подвержена электромагнитным наводкам, поэтому погрешность в данной цепи отсутствует. Распределение и величины погрешностей в системах измерений с цифровым трансформатором тока и напряжения (ЦТН) в соответствии с ИЕС 60044-8, представлены на рис. 2, где показано отсутствие погрешности на входе потребителей информации (благодаря исключению из данной цепочки промежуточных разделительных трансформаторов и аналого-цифровых преобразователей, присущих традиционным схемам).

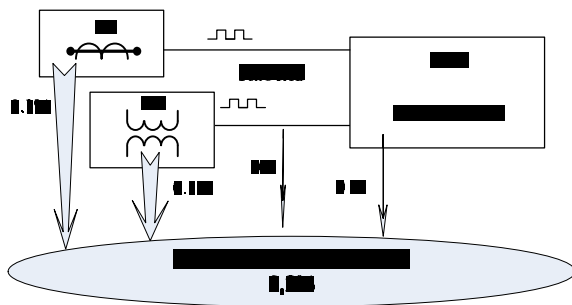


Рис 2. Погрешности в измерительной системе с цифровыми трансформаторами тока и напряжения

В соответствии с докладом заместителя директора по реализации услуг филиала «Ивэнерго» ОАО «МРСК Центра и Поволжья» А.К. Вольского на V Юбилейной ВНПК «Повышение эффективности энергетического оборудования» [5] потери электроэнергии в сетях 6÷10/0,4 кВ за период с 2002 по 2009 г. изменились в пределах от 30 % до 13 %. Эти цифры соответствуют годовым потерям 420 млн. кВт·ч и 146 млн. кВт·ч. При средней стоимости электроэнергии 2,43 руб. за кВт·ч потери в 146 млн. кВт·ч в рублёвом эквиваленте должны составить 355 млн. руб.

Значительная доля потерь электроэнергии в сетях обусловлена следующими факторами:

- погрешностью измерений фактически отпущенной в сеть энергии для потребителей;

• исключением неучтённых подключений потребителей (в частности, хищений электроэнергии).

Внедрение МТТН в значительной мере позволит снизить указанные потери.

Средняя стоимость трёх трансформаторов тока на номинальное напряжение 10 кВ составляет $13400,00 \cdot 3 = 40200,00$ руб.

Средняя стоимость трёхфазного трансформатора напряжения (комплекта из трёх трансформаторов) – 40000,00 руб.

Представленные в статье цены на трансформаторы тока и напряжения отвечают средним ценам на момент публикации статьи для класса точности трансформаторов тока и напряжения 0,5, в то время как для класса точности по току 0,2S и напряжению 0,2, цены в среднем возрастают в 2 раза. Таким образом, результирующая стоимость комплекта 3х3 электромагнитных трансформаторов тока и напряжения класса точности 0,2S и 0,2 соответственно составит 160400,00 руб.

Планируемая стоимость трёхфазного комбинированного комплекта цифровых трансформаторов тока и напряжения 10 кВ составит 200000,00 руб. При расширенном серийном выпуске ЦТТН стоимость будет стремиться к стоимости электромагнитных трансформаторов с аналогичным классом точности.

Кроме того, использование цифрового выхода в будущем позволит уменьшить стоимость цифровых систем релейной защиты и измерений за счёт исключения из них промежуточных (разделительных) трансформаторов и аналого-цифровых преобразователей. Кроме того, медные вторичные кабели будут заменены оптоволоконным кабелем.

Срок окупаемости зависит также от скорости и масштабов внедрения.

Использование ЦТТН улучшит селективность работы и устойчивость функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Однако, экономический эффект, обусловленный улучшением работы РЗА, определить довольно сложно.

Библиографический список

1. **Гречухин В.Н.**, Лебедев В.Д. Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. Спец. выпуск. с. 98-99.
2. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110-750 кВ станций и подстанций энергосистем., Вестник ИГЭУ, вып. 4, 2006, с. 35-42.
3. **Гречухин В.Н.** Концепция использования цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения на подстанциях 110 – 750 кВ Релейная защита и автоматика энерго-

систем, сборник докладов XX конференции, Москва, 1 – 4 июня 2010 г. Научно - инженерное информационное агентство, с. 247 - 253.

4. **Вольский А.К.** Опыт работ по снижению потерь электроэнергии в филиале "Ивэнерго". Повышение эффективности энергетического оборудования // V Всерос. науч.-практ. конф.: 1-2 нояб. 2010 г. Материалы конференции / Под ред. А.В. Мошкарин. - Иваново: ГОУ ВПО Ивановский государ. энергетический университет, 2010. с. 354 - 359.

Е.С. Зайцев, асп., В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СЕЧЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ СО СПЭ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В настоящее время в высоковольтных кабельных сетях лидером по использованию являются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Это связано с высокими характеристиками изолирующего вещества, легкостью обслуживания кабельной линии, а также с увеличением потребляемой мощности крупных городов, где невозможно строительство воздушных линий высокого напряжения.

Ввиду новизны данной продукции на Российском рынке существует нехватка опыта эксплуатации в наших условиях и достаточной нормативной базы по использованию кабелей «нового поколения». Это вынуждает эксплуатирующие организации учиться на своих ошибках и тратить на это немалые средства.

Одной из причин износа и аварий на таких линиях является перегрев изоляции, так как при большой загрузке кабеля тепло, выделяющееся в жиле и в экране, плохо отводится в окружающую среду ввиду низкой температурной проводимости сшитого полиэтилена. В результате происходит расплавление изоляции и выход из строя кабеля. Поэтому температура линии в режиме максимальной нагрузки является лимитирующим параметром при выборе сечения кабеля.

Наилучшим решением этих проблем является создание программно-инструментального комплекса, который будет производить мониторинг фактической температуры кабеля по всей его длине в реальном времени с помощью оптических датчиков и управлять режимом работы линии. Но при этом для выполнения превентивных мер по созданию оптимальных токовых нагрузок КЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабже-

ния потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий, необходимо прогнозирование температуры кабеля.

Первым шагом на пути создания такого комплекса является разработка моделей, позволяющих исследовать тепловые режимы КЛ, и создание на их основе быстродействующего алгоритма расчета температуры кабеля по сечению, позволяющего прогнозировать изменение температуры с учетом изменения нагрузки.

Для решения поставленной задачи авторами были разработаны математические и имитационные модели высоковольтного экранированного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Расчет распределения температуры КЛ выполняется в соответствии с теорией теплопроводности, используя дифференциальное уравнение Фурье

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \cdot \nabla^2 t + \frac{1}{c \cdot \rho} q.$$

Результатом решения данного уравнения являются графики распределения температуры по сечению кабеля (рис. 1) изображенные на рис. 2.

На приведённых графиках отчётливо видна слабая, почти нулевая, зависимость распределения температуры высокотеплопроводных элементов – жилы и экрана кабеля (горизонтальные полки на графиках). Как и предполагалось, в объёме изоляции из сшитого полиэтилена наблюдается большой градиент температур, что приводит к существенной разнице температур экрана кабеля, где устанавливаются датчики температуры, и центральной жилы.

Для определения переходных процессов в температурном поле кабеля была разработана динамическая модель кабельной линии путем построения электрической схемы замещения на основе электротепловой аналогии (рис. 3). Здесь источники тока $J_{ж}$ и $J_{э}$ замещают температурный напор, создаваемый током, протекающим по жиле и экрану кабеля, активные сопротивления $R_{п1} \dots R_{пн}$ – тепловые сопротивления тепловому потоку, емкости $C_1 \dots C_5$ – теплоемкости материалов кабеля, и окружающей среды (грунта). Источник $E_{вн}$ имитирует температуру окружающей среды.

При ступенчатом включении кабеля под нагрузку на модели были получены графики изменения температуры характерных точек сечения КЛ во времени (рис. 4).

По результатам работы статической модели теплового режима кабеля видно, что при организации мониторинга температуры экрана или поверхности КЛ необходимо выполнить расчет самой жилы, т.к. при резком увеличении токовой нагрузки градиент температур будет еще больше, чем показано на рис. 1.

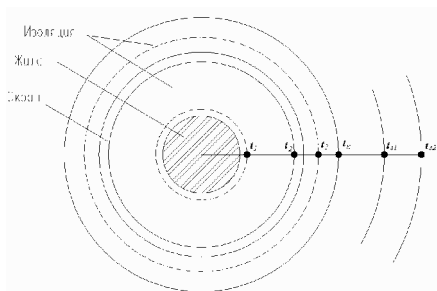


Рис. 1. Сечение кабеля

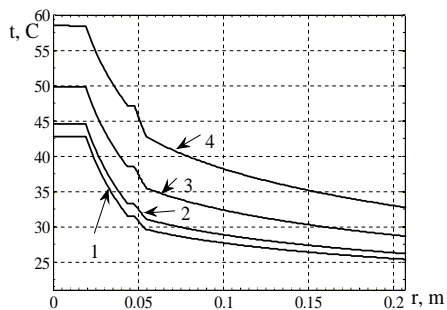


Рис. 2. Распределение температуры в сечении кабеля и окружающем пространстве при токах в экране:

- 1) $I_3 = 0$ А; 2) $I_3 = 200$ А; 3) $I_3 = 400$ А; 4) $I_3 = 600$ А

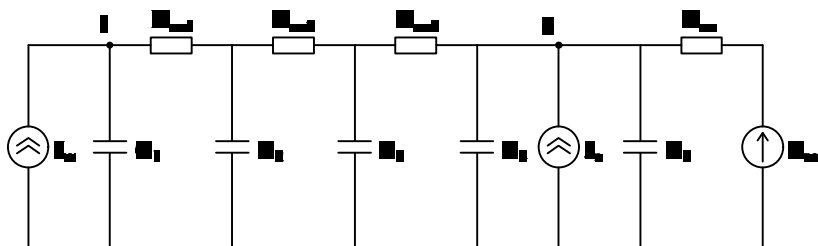


Рис. 3. Электрическая схема замещения тепловой модели КЛ

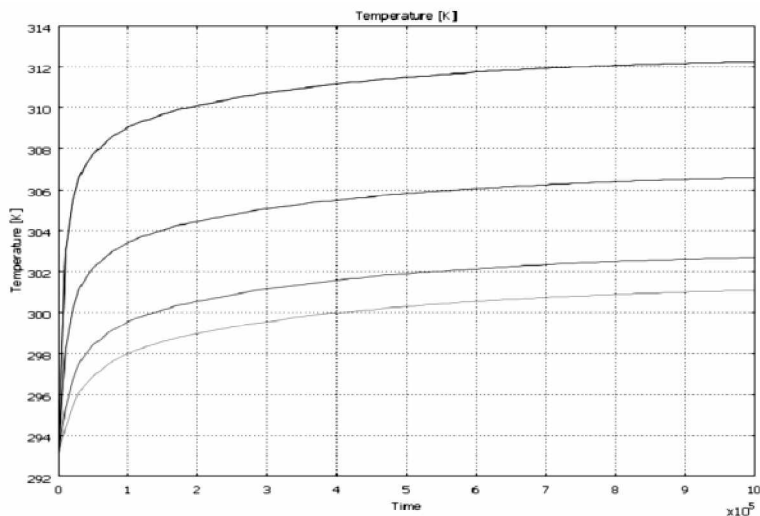


Рис. 4. Графики изменения температуры характерных точек сечения КЛ при ступенчатом изменении нагрузки

Динамическая модель теплового режима работы КЛ позволила проанализировать и спрогнозировать ее работу в переходных режимах. Особенно это актуально для аварийных и послеаварийных режимов работы, которые характеризуются переходными процессами более высокой частоты по сравнению с частотой опроса температуры КЛ современными оптическими системами температурного мониторинга (порядка одного измерения температуры вдоль всей длины кабеля в течение нескольких минут).

Но для работы в реальном времени необходимо создание быстродействующего математического алгоритма расчета температуры. Это возможно осуществить с помощью численных методов интегрирования и созданной на их основе дискретной модели цепи. Наиболее точным и удобным из таких методов является метод трапеций. В соответствии с ним реактивные элементы цепи замещаются схемой, содержащей зависимый источник тока или ЭДС и активное сопротивление. Применяв данный метод к схеме замещения кабеля, получим схему, изображенную на рис. 5.

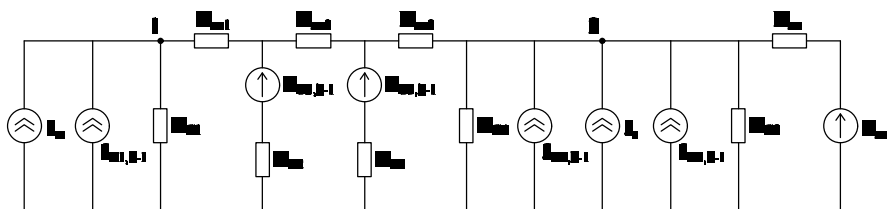


Рис. 5. Дискретная модель схемы замещения

Библиографический список

1. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во «НИВА», 2008, 104 с.
2. **Кузнецов Д.В., Попова Ю.С., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А.** К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // «Электро», № 3, 2009 г., с. 30-33.
3. **Гольдштейн В.Г.,** Лысенкова И.С., Уколова Т.В., Шпиз Л.В. О проблемах эксплуатации кабелей 6-110 кВ из полимерной изоляции // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. Т.3 М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 538 с., с. 364-366.
4. **Титков В.В.** К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // «Кабель-news», № 10 (октябрь), 2009 г., с. 47-51.

*Е.Б. Игнатьев, к.т.н., доц., Д.А. Каманин, асп., И.Е. Сахаров, асп.,
Э.Л. Начатой, асп., Г.В. Попов, д.т.н., проф. (ИГЭУ)*

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6-35 кВ

В электроэнергетике все большее внимание акцентируется на повышении надежности работы силового оборудования. Главными причинами этого являются растущий износ электрооборудования распределительных сетей и неуклонное увеличение показателей ущерба из-за недоотпуска электроэнергии. Одним из важнейших звеньев в цепочке передачи электроэнергии являются электрические подстанции (ПС). Для них внедряются современные технологии телесигнализации (ТС), телеизмерения (ТИ) и телеуправления (ТУ), которые весьма дороги и, как правило, требуют наличия физического канала связи ПС с удаленным диспетчерским пунктом. Считается, что такие системы целесообразно устанавливать

только на ПС не ниже 110 кВ. ПС 6-35 кВ в подавляющем большинстве случаев оснащены лишь примитивными системами телесигнализации с предельно низкой информативностью, которые позволяют оперативному персоналу узнать только о факте срабатывания центральной сигнализации (ЦС) подстанции, иногда без разделения на аварийный и предупредительный сигналы. Подстанции 6-35 кВ, в отличие от ПС 110 кВ и выше, обычно находятся на обслуживании оперативно-выездной бригады (ОВБ) сетевого предприятия и значительно удалены от мест базирования ОВБ. Таким образом, в период массовых отключений, а так же в нормальном режиме эксплуатации, недостаток телеметрической информации с ПС 6-35 кВ приводит к дополнительным потерям времени и материальных ресурсов.

Следует отметить, что оснащение ПС 6-35 кВ комплексами телемеханики аналогичными устанавливаемым на ПС 110 кВ и выше, экономически затруднительно для большинства сетевых предприятий. Таким образом, возникает необходимость создания и внедрения эффективного программно-аппаратного комплекса мониторинга удаленных подстанций 6-35 кВ, способного показывать не только оперативное состояние оборудования, но также контролировать его техническое состояние в реальном времени. Комплекс должен отличаться компактностью, быстротой развертывания, а так же невысокой стоимостью оборудования, пуска наладочных работ и эксплуатации. При этом комплекс должен соответствовать всем требованиям надежности, информационной безопасности и обеспечивать достоверность передаваемой информации.

Современный уровень развития GSM-сетей и сети Internet, позволяет создать на их основе систему мониторинга соответствующую вышеуказанным требованиям.

Система состоит из подстанционной, серверной и клиентской частей. Подстанционная часть включает в себя множество датчиков, установленных на оборудовании ПС, которые объединены контроллером со встроенным GSM-модемом. На случай исчезновения напряжения на шинах собственных нужд ПС, для обеспечения функционирования системы, предусматривается источник бесперебойного питания. Используя сервисы GSM-сети: GPRS, CSD и SMS; модем способен передавать телеметрическую информацию в центр обработки данных (ЦОД), расположенный в Internet. ЦОД обслуживает множество удаленных ПС и состоит из сервера мониторинга, сервера диагностики и web-сервера. Сервер мониторинга имеет возможность принимать информацию со стороны ПС, как через Internet, так и посредством сервисов CSD и SMS, благодаря наличию собственного GSM-модема. Сервер диагностики получает данные от сервера

мониторинга и записывает их в SQL базу данных (БД), которая, в реальном времени обрабатывается экспертной системой, с целью анализа оперативной обстановки на ПС и оценки технического состояния оборудования. Сохраненная на сервере диагностики телеметрическая информация, а так же заключения экспертной системы, передаются на web-сервер. Данные, представленные на web-сервере, доступны оперативному и техническому персоналу посредством сети Internet и персонального компьютера с установленным стандартным web-браузером.

Надежность функционирования системы достигается посредством маршрутизации данных между доступными GSM-сервисами и GSM-операторами на стороне ПС, а также использованием основного и резервного серверов мониторинга на стороне ЦОД. Информационная безопасность обеспечивается применением защищенных протоколов на основе сертификата открытого ключа для передачи данных между ПС и ЦОД, а также web-сервером и пользователем. Кроме того, на стороне сервера мониторинга предусматривается контроль номера мобильного абонента (IMSI) в случае работы через CSD или SMS. На сервере мониторинга происходит сохранение проходящих через него данных, чем обеспечивается резервирование SQL БД сервера диагностики. Достоверность принимаемой телеметрической информации контролируется экспертной системой путем отслеживания взаимоисключающих и маловероятных событий.

Возможность использования готового радиоканала, способность одного ЦОД контролировать множество подстанций, а так же отсутствие специального клиентского программного обеспечения значительно снижает стоимость системы мониторинга и повышает скорость развертывания комплекса, при сохранении достаточного уровня надежности и информационной безопасности. Кроме того, система способна выполнять функции АСКУЭ, что позволяет использовать ее как комплексное решение для небольших ПС.

Применение данной системы для мониторинга удаленных ПС 6-35 кВ позволит сократить количество и время ликвидации технологических нарушений в электрических сетях.

А.В. Егоров, ген. директор, С.Г. Зайцев, к.т.н., нач. ЭТО (ООО «Петропроект»), А.В. Макаров, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

ПРИМЕНЕНИЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Строительство современного многофункционального Морского торгового порта Усть-Луга, расположенного на Лужской губе Финского залива и прилегающих к нему территориях (как альтернатива Таллиннскому Морскому порту), должно способствовать эффективной интеграции России в мировое экономическое пространство (рис. 1).



Рис.1. Эскизное задание на прокладку кабеля резервного ввода ЗРУ-10 кВ от существующей ОРП-1 (на основе снимка с вертолета)

Проект внешнего электроснабжения (3-го резервного ввода) закрытого распределительного устройства (ЗРУ-10 кВ) нефтебазы «Усть-Луга» от опорной распределительной подстанции (ОРП-1) Морского торгового порта (МТП) «Усть-Луга» выполнен на основании:

- задания на проектирование по объекту: «Балтийская трубопроводная система (БТС-П). Нефтебаза «Усть-Луга»;

- технических условий (ТУ) на присоединение электроустановок ООО «Усть-Лужский бункеровочный комплекс» (УЛБК), выданных ОАО «Ленэнерго»;
- заключения об инженерно-геологических условиях участка проектируемого строительства кабельной линии (КЛ);
- данных ОАО «Гипротрубопровод» по нагрузкам аварийной брони;
- проектов электроснабжения нефтебазы «Усть-Луга» по двум основным вводам 10 кВ, выполненных ОАО «Гипротрубопровод»;
- ряда дополнительных документов.

Проектом предусмотрено подключение 3-го резервного ввода ЗРУ-10 кВ к ячейке ОРП-1. Внешнее электроснабжение ОРП-1 осуществляется по четырем КЛ-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) типа 2хАПвВнг-3х(1х240/50-10) от ячеек ЗРУ-10 кВ ПС № 549 «Порт». Схема однолинейная принципиальная электроснабжения приведена на рис. 2.

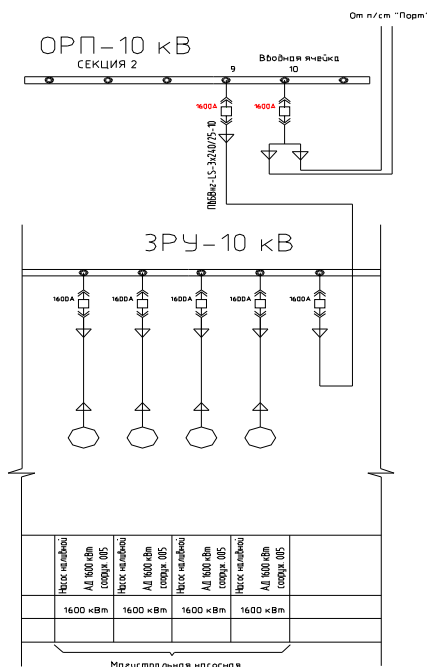


Рис. 2. Схема однолинейная принципиальная электроснабжения ЗРУ-10 кВ от ОРП-1

1. Выбор питающего кабеля

В соответствии с заданием на проектирование присоединяемая мощность составляет 2300 кВА по режиму 1, но КЛ 3-го ввода должна быть рассчитана на передачу мощности 6700 кВА по режиму 2 (см. табл. 1).

Таблица 1.

Номер режима КЛ	Мощность, кВА	Ток, А
Режим 1	2300	133
Режим 2	6700	387

Для выбора сечения кабеля за расчетное значение тока принимается ток в режиме 2 – $I_{расч} = 387 \text{ А}$.

В соответствии с ТУ кабель 3-го ввода должен быть из СПЭ. С учетом противопожарных требований выбран кабель ПвБВнг(А)-LS – 3*240(25)-10. Согласно справочной информации на силовые кабели на напряжение 10 кВ с изоляцией из СПЭ длительно допустимый ток кабеля типа ПвБВнг(А)-LS – 3*240(25)-10 имеет следующие значения: а) при прокладке в земле при температуре окружающей среды (ОС) +15⁰С: $I_{дл.доп} = 500 \text{ А}$; б) при прокладке в воздухе при температуре ОС +25⁰С: $I_{дл.доп} = 562 \text{ А}$. Для участков кабельной трассы с проходом кабелей в воздухе по лоткам длительно допустимый ток соответствует значению $I_{дл.доп} = 0,9 \cdot 562 \cdot 0,93 = 470 \text{ А}$, где коэффициент 0,9 учитывает неравномерность распределения тока по фазам, а коэффициент 0,93 учитывает взаимное тепловое влияние кабелей при расположении на полке 2-х кабельных линий и числе полок равному шести. Можно также принять, что произведение указанных коэффициентов учитывает и тепловое влияние кабельного лотка. Согласно справочной информации на силовые кабели на напряжение 10 кВ с изоляцией из СПЭ, при прокладке кабельной трассы в земле в трубах длительно допустимый ток КЛ, проложенной в грунте, пересчитывается с учетом понижающего коэффициента 0,9. Тогда длительно допустимый ток для данного участка трассы соответствует значению $I_{дл.доп} = 0,9 \cdot 500 = 450 \text{ А}$, то есть длительно допустимый ток для КЛ от ОРП-1 до ЗРУ-10 кВ соответствует величине: $I_{дл.доп} = 450 \text{ А}$ (в летнее время при температуре ОС +25⁰С).

В результате расчетов имеем следующее соотношение

$$I_{расч} = 387 \text{ А} < I_{дл.доп}^{(+25)} = 450 \text{ А}.$$

Таким образом, длительно допустимый ток в летнее время принимается 450 А, что соответствует мощности 7785 кВА, следовательно, выбранный питающий кабель проходит по нагрузочным режимам работы.

Проведенные расчеты токов короткого замыкания и проверка кабеля по термической стойкости при коротких замыканиях показали, что выбранный кабель ПвБВнг-LS-3х240/25-10 проходит по условию термической стойкости при коротких замыканиях.

Проведенные расчеты пусков асинхронных двигателей ЗРУ-10 кВ при питании от ОРП-1 позволили сделать вывод, что выбранный кабель проходит по условиям пусков двух насосов пожаротушения (по 400 кВт каждый), а также для пусков трех наливных насосов (по 1600 кВт каждый).

Пуск четвертого наливного насоса при работающих трех и необходимой нагрузке аварийной брони не рекомендуется в связи с перегрузкой кабеля по допустимому току.

2. Прокладка кабельной линии.

Проектом предусмотрено разделение КЛ между организациями ООО «Петропроект» и ОАО "Гипротрубопровод" по границе проектирования, идущей вдоль ограждения Нефтебазы "Усть-Луга". На основании инженерно-геологических изысканий на глубине прокладки КЛ залегают насыпные грунты, представленные песками различной крупности, неоднородными по составу и свойствам, неравномерно уплотненными, обладающими различной сжимаемостью.

Грунтовые воды со свободной поверхностью на период выполнения полевых работ зафиксированы на глубинах 0,9÷1,4 м, на абсолютных отметках 2,30÷1,80 м они приурочены к насыпным грунтам, а также пескам современных морских отложений. Питание инфильтрационное, за счет атмосферных осадков.

Для обеспечения надежной работы КЛ-10кВ совместно с силовым кабелем в одной траншее прокладываются контрольные кабели релейной защиты и оптико-волоконный кабель связи для передачи данных АСКУЭ, АСТУЭ.

От ячейки № 9 ОРП-1 КЛ-10кВ прокладывается по существующим кабельным конструкциям в кабельном подвале здания ОРП-1, далее по территории ОРП-1 в существующем кабельном железобетонном канале по кабельным конструкциям.

Контрольные кабели и кабель связи прокладываются от аппаратуры релейной защиты и аппаратуры АИИС до траншеи по существующим кабельным конструкциям в лотках.

Далее КЛ прокладывается в земляной траншее до границы проектирования, при этом кабель 10кВ на всем протяжении защищен полиэтилено-

вой трубой (по требованию завода-изготовителя), а контрольные кабели и кабель связи прокладываются непосредственно в траншее и защищаются трубами при пересечении других коммуникаций (в соответствии с ПУЭ).

Проектируемая КЛ пересекает автомобильную дорогу (а/д), железнодорожные пути (ж/д), а также ряд других коммуникаций. При пересечении а/д и ж/д кабели прокладываются в полиэтиленовых (п/э) трубах, причем пересечение ж/д выполнено методом горизонтального направленного бурения (ГНБ). При пересечении с ж/д кабель связи и контрольные кабели укладываются в самостоятельные п/э трубы (труба в трубе).

Выводы:

1. Проектирование кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в особых условиях эксплуатации требует проведения дополнительных расчетов, как в рабочих режимах, так и в режимах перегрузки и послеаварийных.

2. В ряде случаев (например, при прокладке в защитных трубах) преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (большой допустимый ток по сравнению с кабелями с другой изоляцией) уменьшаются, так как приходится уменьшать допустимый передаваемый по кабельной линии ток.

*О.В. Таламанов, к.т.н., (ООО «Интер Энерго»),
А.В. Макаров, к.т.н., доц. (ИГЭУ)*

ЗАЩИТА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Внедрение современной микропроцессорной (МП) аппаратуры в электроэнергетике позволяет достигать повышения эффективности работы энергообъектов за счет высокой функциональности таких устройств, простоты и гибкости их настройки. Одним из основных недостатков МП аппаратуры является ее высокая чувствительность к помехам, как по входным цепям, так и по цепям питания.

Одним из основных типов помех, влияющих на функционирование МП аппаратуры, являются микросекундные импульсные перенапряжения.

Источники импульсных перенапряжений и способы их снижения

Основными источниками микросекундных импульсных перенапряжений являются молниевые разряды в элементы системы молниезащиты объекта и коммутации первичного оборудования.

Основными мерами по снижению микросекундных импульсных перенапряжений, возникающих при молниевых разрядах в элементы системы молниезащиты объекта, применяемыми на стадии проектирования энергообъектов, являются:

1. Разработка компоновочных решений, при которых должно быть обеспечено максимально возможное расстояние между молниеотводами и защищаемыми объектами.

2. Разработка системы заземления, обеспечивающей расстояние по магистралям заземления между молниеотводами и защищаемыми объектами достаточное для того, чтобы растекание тока по элементам заземляющего устройства обеспечило уменьшение импульсных перенапряжений до величины, не представляющей опасности для изоляции трасс прокладки вторичных цепей и входов МП аппаратуры.

При неблагоприятных условиях (высокий ожидаемый ток молнии, высокое удельное сопротивление грунта) изложенные меры не всегда позволяют обеспечить снижение указанных импульсных перенапряжений.

Основной мерой по снижению перенапряжений микросекундных импульсных перенапряжений, возникающих при коммутационных операциях, является разработка технических решений по организации трасс прокладки вторичных цепей. Трассы прокладки вторичных цепей, по возможности, не должны прокладываться под ошиновками, кроме того, должны быть разработаны меры по экранированию вторичных цепей [0, 0].

Принимаемые меры не всегда позволяют обеспечить снижение импульсных перенапряжений до значений, не представляющих опасности для входов МП аппаратуры. Это подтверждается результатами измерений коммутационных перенапряжений в высоковольтных сетях.

Максимальные величины коммутационных перенапряжений, как правило, возникают в цепях ВЧ связи и ВЧ защиты. Это связано с тем, что указанные устройства, как правило, устанавливаются на одну или две фазы и являются несимметричными.

Некоторые примеры осциллограмм коммутационных перенапряжений, полученные авторами экспериментально, представлены на рис. 1, 2.

Возможность превышения величинами перенапряжений уровней устойчивости МП аппаратуры требует применения дополнительных технических средств для обеспечения надежной работы МП аппаратуры.

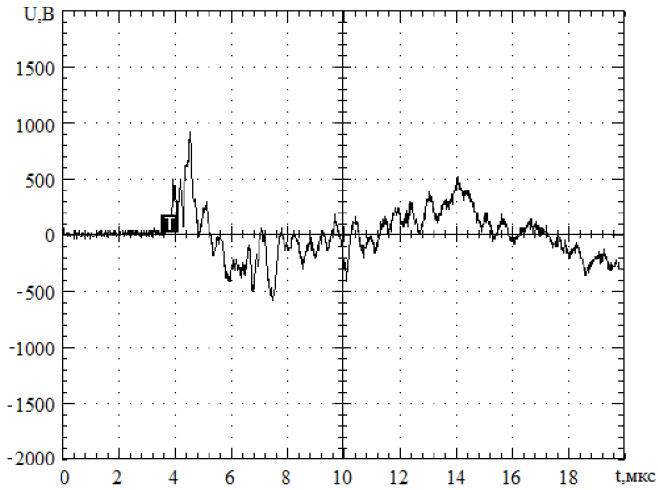


Рис. 1. Осциллограмма перенапряжений в цепях ТТ 500 кВ при коммутации разъединителем

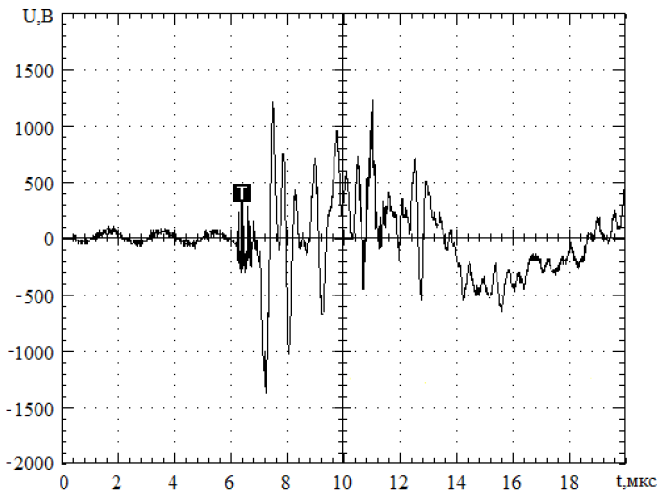


Рис. 2. Осциллограмма перенапряжений в цепи ВЧ связи 220 кВ при коммутации разъединителем

Для этих целей используются устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

Рекомендации по установке УЗИП

Для защиты от импульсных перенапряжений, вызванных первичными проявлениями молниевых разрядов необходима установка УЗИП 1-го класса (на базе разрядников) во все цепи, связанные с аппаратурой, устанавливаемой на элементы системы молниезащиты.

Особое внимание необходимо уделять системе питания (например, в случае размещения прожекторов освещения на элементах системы молниезащиты), так как возникающие при разряде молнии перенапряжения могут представлять опасность для МП аппаратуры не только по сигнальным цепям, но и по цепям питания.

Защита от импульсных перенапряжений, вызванных вторичными проявлениями молниевых разрядов, как правило, должна осуществляться на стадии проектирования выбором компоновочных решений, учетом требований ограничения перенапряжений при проектировании заземления и трасс прокладки вторичных цепей.

В неблагоприятных случаях, когда указанными мерами снизить возникающие перенапряжения до величин, не представляющих опасности для входов МП аппаратуры, не представляется возможным, в цепи, в которых возможно возникновение опасных перенапряжений должна быть предусмотрена установка УЗИП 2-го класса (на базе варисторов).

На стадии проектирования уровень перенапряжений, прикладываемый к входам МП аппаратуры, должен определяться расчетными методами. Необходимость установки УЗИП в эти цепи должна определяться на стадии Итогового контроля после проведения экспериментальной оценки величины перенапряжений, возникающих при молниевых разрядах.

На основе опыта измерения коммутационных перенапряжений в сетях различного класса напряжений можно сформулировать следующие рекомендации по установке УЗИП, которые необходимо осуществить на стадии проектирования для защиты МП аппаратуры:

1. В сетях 35 кВ и ниже коммутационные перенапряжения, как правило, не представляют опасности для МП аппаратуры и установка УЗИП, как правило, не требуется.

2. В сетях 110 кВ коммутационные перенапряжения могут представлять опасность для МП аппаратуры, к которой подходят цепи ВЧ связи и ВЧ защиты. При проектировании энергообъектов рекомендуется предусмотреть установку УЗИП в эти цепи. Окончательный вывод о необхо-

димости установки УЗИП должен быть принят на стадии Итогового контроля после измерения величин перенапряжений в указанных цепях.

3. В сетях 220 кВ и выше коммутационные перенапряжения могут представлять опасность как для МП аппаратуры, к которой подходят цепи ВЧ связи и ВЧ защиты, так и для МП аппаратуры, к которой подходят прочие сигнальные цепи. При проектировании энергообъектов рекомендуется обязательная установка УЗИП в цепи ВЧ связи и ВЧ защиты. В прочие сигнальные цепи рекомендуется предусмотреть установку УЗИП, необходимость установки которых должна быть определена на стадии Итогового контроля.

Предложенные рекомендации по установке УЗИП систематизированы в табл. 1.

Таблица 1. **Необходимость установки УЗИП в сигнальные цепи, подходящие к МП аппаратуре**

Сети, в которых проводятся коммутации	Необходимость установки УЗИП	
	В цепи ВЧ связи	В прочие сигнальные цепи
35 кВ и ниже	Не требуется	Не требуется
110 кВ	Должна быть предусмотрена возможность	Не требуется
220 кВ и выше	Требуется	Должна быть предусмотрена возможность

Заключение

При проектировании энергообъектов для защиты устанавливаемой микропроцессорной аппаратуры от импульсных перенапряжений, вызванных молниевыми разрядами в элементы системы молниезащиты и возникающих при коммутационных операциях, необходимо обеспечить выбор компоновочных решений, организации заземления и трасс прокладки вторичных цепей с учетом требований ограничения перенапряжений.

При неблагоприятных условиях необходима дополнительная установка устройств защиты микропроцессорной аппаратуры от импульсных перенапряжений. Состав и места расположения УЗИП в основном определяются классом напряжения объекта, организацией его системы молниезащиты, а также расположением трасс прокладки вторичных цепей и цепей питания.

Библиографический список

1. **Кузнецов М.Б., Кунгуров Д.А., Матвеев М.В., Тарасов В.Н.** Проблемы защиты входных цепей аппаратуры РЗА от мощных импульсных перенапряжений / Вести в электроэнергетике, № 1, 2007.
2. **Кузнецов М.Б., Кунгуров Д.А., Матвеев М.В., Тарасов В.Н.** Входные цепи устройств РЗА: проблемы защиты от мощных импульсных перенапряжений / Новости электротехники № 1, 2008.
3. **Зоричев А.Л.** Защита электропитающих установок от импульсных грозовых и коммутационных перенапряжений.
4. **Зоричев А.Л., Лещинский В.Г.** Комплексная защита объектов связи от импульсных токов и перенапряжений.