

*На правах рукописи*



**Майнагашев Роман Александрович**

**КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ  
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 КВ  
ШАХТ И РУДНИКОВ И СПОСОБ  
ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2011

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО  
«Сибирский федеральный университет», г.Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Кузьмин Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Цугленок Галина Ивановна

кандидат технических наук  
Скакунов Дмитрий Александрович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Сибирский государственный  
индустриальный университет (СибГИУ)»,  
г.Новокузнецк

Защита диссертации состоится «26» октября 2011г. в 16 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

Автореферат разослан «26» сентября 2011г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДМ 212.099.07



Т.М. Чупак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На современном этапе развития систем электроснабжения (СЭС) 6 кВ шахт и рудников широкое использование вакуумных коммутационных аппаратов, интенсивное старение изоляции кабельных линий, трансформаторов и электродвигателей и низкая эффективность защит от коммутационных перенапряжений (КП) привело к тому, что аварийность распределительных сетей за последние пять лет возросла в 1,6 раза.

Опыт эксплуатации электрооборудования в сетях 6 кВ шахт и рудников показал, что основной объем аварийных отключений связан с пробоями изоляции из-за воздействия КП и обрывом одной из фаз сети. Статистика показывает, что более 50% однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий возникает по причине КП.

Проблема защиты изоляции высоковольтного электрооборудования от КП приобрела наибольшую актуальность после широкого внедрения вакуумных коммутационных аппаратов. Данная проблема наиболее характерна для часто коммутируемых электроприемников с пониженным уровнем прочности изоляции, к которым относятся электродвигатели и трансформаторы, эксплуатируемые в шахтах и рудниках.

Вопросам исследования КП в системах электроснабжения 6 – 10 кВ горных предприятий посвящены работы следующих ученых: Щуцкого В.И., Гончарова А.Ф., Эпштейна И.Я., Разгильдеева Г.И., Мнухина А.Г., Каганова З.Г. и других.

В период с 1975г. по 2003г. интенсивно разрабатывались средства ограничения КП, такие как ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), RC-ограничители и RC-гасители. Разработка средств защиты от КП позволила в некоторой степени снять остроту проблемы КП в сетях 6 кВ шахт и рудников, так как снизилось число пробоев изоляции кабельных линий и электродвигателей, однако интенсивность пробоев изоляции обмоток трансформаторов остается весьма высокой.

Это, в первую очередь, связано с отсутствием эффективных средств ограничения перенапряжений, возникающих при коммутации сухих силовых трансформаторов и методов оценки КП в сетях 6 кВ шахт и рудников.

Решение указанных задач является актуальным, так как позволит спрогнозировать величину КП в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников и обоснованно подойти к выбору средств защиты от КП электродвигателей и трансформаторов, что положительно отразится на надежности СЭС технологических комплексов.

**Целью работы** является повышение надежности систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников на основе разработки эффективных способов и средств защиты силовых сухих трансформаторов от КП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Проанализировать современные исследования КП в СЭС 6 - 10 кВ промышленных предприятий, а также методы их оценки и прогнозирования.

2. Выполнить экспериментальные исследования перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов в сетях 6 кВ шахт и рудников, с последующей статистической обработкой данных для выявления основных факторов, определяющих величину и характер КП.

3. С помощью экспериментальных исследований и компьютерного моделирования оценить кратность перенапряжений при коммутации трансформаторов в неполнофазном режиме, установить влияние угла коммутации на величину КП и определить взаимосвязь между кратностями КП, возникающих в обмотках высокого и низкого напряжений трансформатора, при его отключении от сети.

4. Обосновать метод оценки и прогнозирования КП в сетях 6 кВ применительно к условиям шахт и рудников.

5. Разработать эффективный способ и устройство защиты трансформаторов от КП, основанный на компенсации реактивной мощности.

**Объект исследования:** высоковольтные системы «выключатель – кабельная линия – электроприемник», эксплуатируемые в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников.

**Предмет исследования:** закономерности протекания коммутационных процессов, возникающих в системе напряжением 6 кВ «выключатель – кабельная линия - электроприемник».

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории электрических цепей и электрических измерений, теории СЭС промышленных предприятий, теории электрических машин, методы компьютерного моделирования переходных процессов в электрических схемах с помощью программного обеспечения MatLab и MultiSim, методы математической статистики.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Получены зависимости максимальных кратностей коммутационных перенапряжений от типа и мощности трансформаторов, коммутируемых вакуумными выключателями, показывающие, что перенапряжения при коммутации трансформаторов в распределительных сетях шахт и рудников на 25 - 30 % выше по сравнению с распределительными сетями общепромышленного назначения.

2. Установлена закономерность увеличения кратности перенапряжений до 18% при коммутации силовых трансформаторов в неполнофазном режиме по отношению к нормальному режиму работы сети 6 кВ шахт и рудников.

3. Обоснован способ ликвидации условий возникновения перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов основанный на принципе компенсации реактивной мощности со стороны обмотки низкого напряжения.

**Практическая значимость:**

1. Обоснованы методы прогнозирования КП в сетях 6 кВ, а в перспективе и в сетях 10 кВ, применительно к условиям шахт и рудников, позволяющие оценить величину коммутационных перенапряжений в любой точке высоко-

вольтной системы «вакуумный выключатель – кабельная линия - электроприемник» и целенаправленно выбрать необходимые средства защиты от перенапряжений.

2. Усовершенствованы и внедрены низковольтные автоматически регулируемые конденсаторные установки с постоянно включенной первой ступенью, емкость которой выбирается из условия глубокой компенсации тока холостого хода трансформатора, позволяющие не только компенсировать реактивную мощность, но и ликвидировать условия возникновения перенапряжений при коммутации трансформаторов.

**Реализация полученных результатов.** Обоснованные методы прогнозирования КП использовались в расчетах перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов в системах электроснабжения 6 кВ калийных рудников ОАО «Уралкалий» и горно-обогатительного комбината «Нюрбинский» АО «АЛРОСА». Усовершенствованные конденсаторные установки успешно эксплуатируются на Нюрбинском ГОКе АО «АЛРОСА». За период работы с 2009г. по 2011г. не было зафиксировано ни одного случая выхода из строя трансформаторов 6/0,69 кВ мощностью 630 кВА по причине воздействия КП.

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по электротехническим специальностям в Сибирском федеральном университете (СФУ) и приняты к внедрению на ОАО «СКЗ КВАР», которое является одним из ведущих предприятий России по выпуску автоматически регулируемых конденсаторных установок.

**Обоснованность и достоверность научных положений** подтверждается удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов исследований, положительным опытом эксплуатации усовершенствованных устройств на Нюрбинском ГОКе АО «АЛРОСА».

#### **На защиту выносятся:**

1. Полученные зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов, коммутируемых вакуумными выключателями, позволяющие повысить достоверность прогнозирования КП в сетях 6 кВ шахт и рудников и обосновать средства защиты от перенапряжений.

2. Зависимость соотношений между кратностями КП, возникающими в обмотках высокого (ВН) и низкого (НН) напряжений от коэффициента трансформации и мощности силовых трансформаторов, подтверждающая гипотезу о том, что переход волны КП из обмотки ВН в обмотку НН не зависит от коэффициента трансформации и осуществляется за счет емкостных связей между данными обмотками.

3. Установленная закономерность увеличения кратности перенапряжений до 18% при коммутации трансформаторов в случае обрыва одной из фаз сети 6 кВ по отношению к нормальному режиму эксплуатации.

4. Полученная зависимость кратности перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов вакуумным выключателем от коэффициента мощности, позволяющую использовать принцип компенсации реактивной мощно-

сти, как способ, ликвидирующий условия возникновения КП в системе «вакуумный выключатель – кабельная линия - трансформатор»

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Международная научно-практическая конференция «Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота» (г.Красноярск, 2006 г.); I Международная научно-практическая конференция «ИНТЕХМЕТ-2008» (г.Санкт-Петербург, 2008 г.); IX Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г.Красноярск, 2008 г.); X Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г.Красноярск, 2009г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 11 печатных работ, из которых 3 статьи в периодическом издании по списку ВАК; 8 работ в трудах международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, библиографического списка из 123 наименований. Основной текст диссертационной работы изложен на 145 страницах, проиллюстрирован 58 рисунками и 24 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, дается общая характеристика работы, её научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследований, отражены вопросы реализации и апробации научных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ аварийности распределительных сетей 6 кВ шахт и рудников, обобщены результаты исследований КП в распределительных сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий.

Показано, что на современном этапе развития СЭС шахт и рудников основная причина, влияющая на аварийность распределительных сетей и электрооборудования - это сочетание КП, естественного старения изоляции кабельных линий, электродвигателей и трансформаторов и обрывы отдельных фаз сети.

Широкое использование вакуумных выключателей, современная компоновка передвижных трансформаторных подстанций (ПТП), у которых вакуумные выключатели подключаются непосредственно к вводам обмотки ВН трансформатора (подстанции типа КТСВП) и низкая эффективность средств защиты от КП, привели к тому, что аварийность СЭС шахт и рудников за последние 5 лет возрасла в 1,6 раза.

Наиболее повреждаемыми элементами СЭС являются кабельные линии (КЛ) и трансформаторы. На их долю приходится около 75% аварийных ситуаций, а доля высоковольтных электродвигателей и ячеек составляет не более 22%.

Основными причинами аварийности КЛ являются пробой изоляции разделок кабеля, которые связаны с вводом электроприемника и обрывы отдель-

ных жил кабеля. По данным причинам происходит соответственно 45% и 32% повреждений КЛ. Основными причинами аварийности трансформаторов являются пробой изоляции и перекрытия вводов обмоток высокого и низкого напряжений. По данным причинам происходит около 60% выходов из строя трансформаторов. При этом пробой изоляции и перекрытия вводов обмотки НН происходят в два раза чаще в сравнении с обмоткой ВН.

Кроме этого анализ аварийности трансформаторов показывает, что при обрыве одной из фаз питающей сети, (неполнофазный режим), пробой изоляции обмоток трансформатора или разделки кабеля связанные с вводами трансформатора превышают аналогичные пробой изоляции при симметричном режиме питания трансформатора практически в 2 – 2,5 раза. Можно предположить, что кратность перенапряжений при коммутации в неполнофазном режиме выше, чем при симметричном режиме сети.

Следовательно, разработка эффективных способов и средств защиты трансформаторов от КП позволит повысить надежность СЭС 6 кВ шахт и рудников, так как сократит количество пробоев изоляции обмоток трансформаторов и разделок кабелей, связанных с вводами трансформаторов.

**Во второй главе** обоснованы методика и приборная база для измерения перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов.

Приведены результаты измерений, проведенных на предприятиях ОАО «Уралкалий», АО «Алроса» Нюрбенский ГОК и статистической обработки данных КП в сетях 6 кВ шахт и рудников. Для фиксации и осциллографирования КП использовался компенсационный RC- делитель типа ДНЕК-10 и четырехканальный цифровой осциллограф Tektronix TDS2024B. КП фиксировались как на вводах электроприемника, так и на зажимах выключателя. Это позволило оценить влияние параметров электроприемника, кабельной линии на величину и кратность КП в разных точках системы «выключатель – кабельная линия - электроприемник».

На основе статистической обработки экспериментальных данных получены зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов для вакуумных выключателей, данные зависимости представлены на рисунках 1 и 2.

На рисунках 1 и 2 приведены зависимости  $K_{max} = f(P_{де})$  и  $K_{maxВН} = f(S_{mp})$  не только для сетей 6 кВ шахт и рудников, но и для общепромышленных сетей.

Сопоставив результаты измерений КП на зажимах асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых в сети 6 кВ шахт и рудников с аналогичными измерениями КП для общепромышленных сетей, можно видеть, что данные практически совпадают. Это указывает на то, что параметры асинхронных электродвигателей напряжением 6 кВ, эксплуатируемых в шахтах и рудниках, в режиме коммутации, близки к параметрам асинхронных электродвигателей, которые используются в общепромышленных сетях 6кВ.

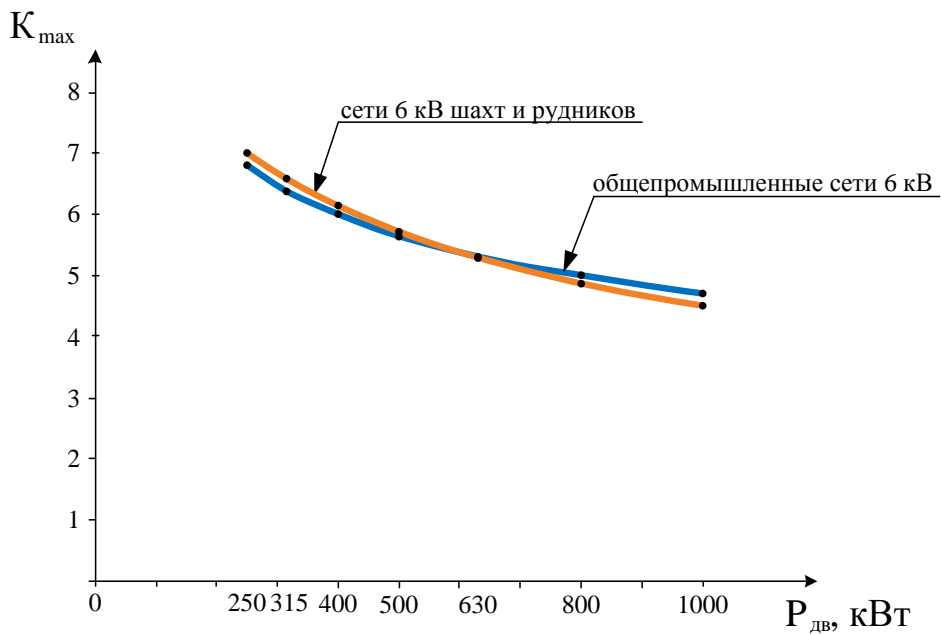


Рисунок 1 - Зависимость  $K_{max}$  от мощности асинхронных электродвигателей

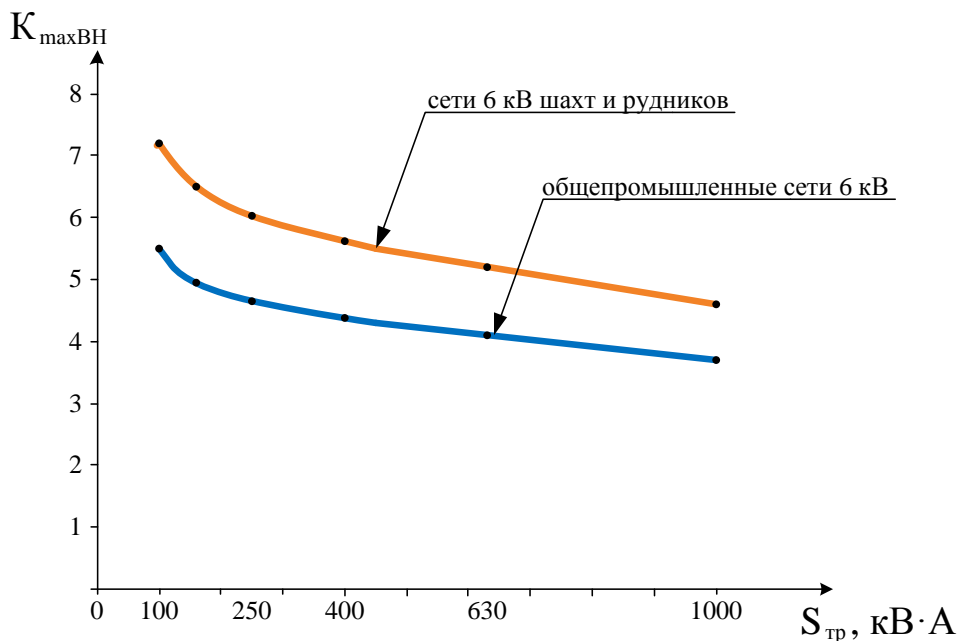


Рисунок 2 - Зависимость  $K_{maxВН}$  от мощности сухих трансформаторов

В то же время кратность перенапряжений, возникающих при коммутации сухих трансформаторов в шахтах и рудниках, в среднем на 25 – 30% выше кратности КП аналогичных трансформаторов общепромышленного назначения. Выявленные закономерности необходимо учитывать при выборе метода оценки и прогнозирования КП в сетях 6 кВ шахт и рудников.

Установлено, что в неполнофазном режиме сети кратность перенапряжений при коммутации трансформаторов возрастает на 15 – 18%.

Экспериментальные исследования показали, что кратность КП в обмотке НН ( $K_{maxНН}$ ) по сравнению с кратностью КП в обмотке ВН ( $K_{maxВН}$ ) гораздо выше. Зависимость  $K_{maxНН} = f(S_{тр})$  приведена на рисунке 3, а на рисунке 4 показана



но изменение отношения  $\lambda = K_{maxHH} / K_{maxBH}$  в зависимости от коэффициента трансформации и мощности трансформатора.

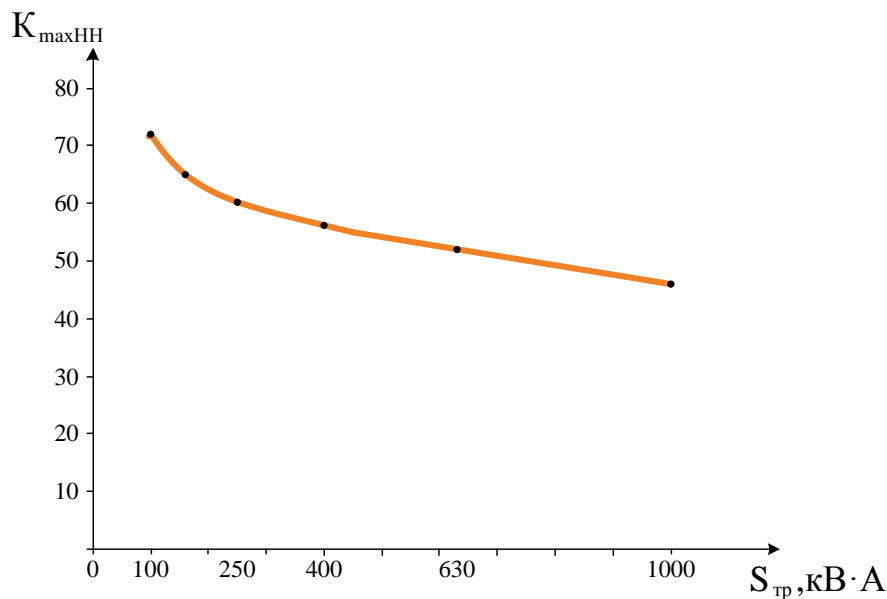


Рисунок 3 - Зависимость  $K_{maxHH}$  возникающих в обмотках низкого напряжения от мощности сухих трансформаторов шахт и рудников

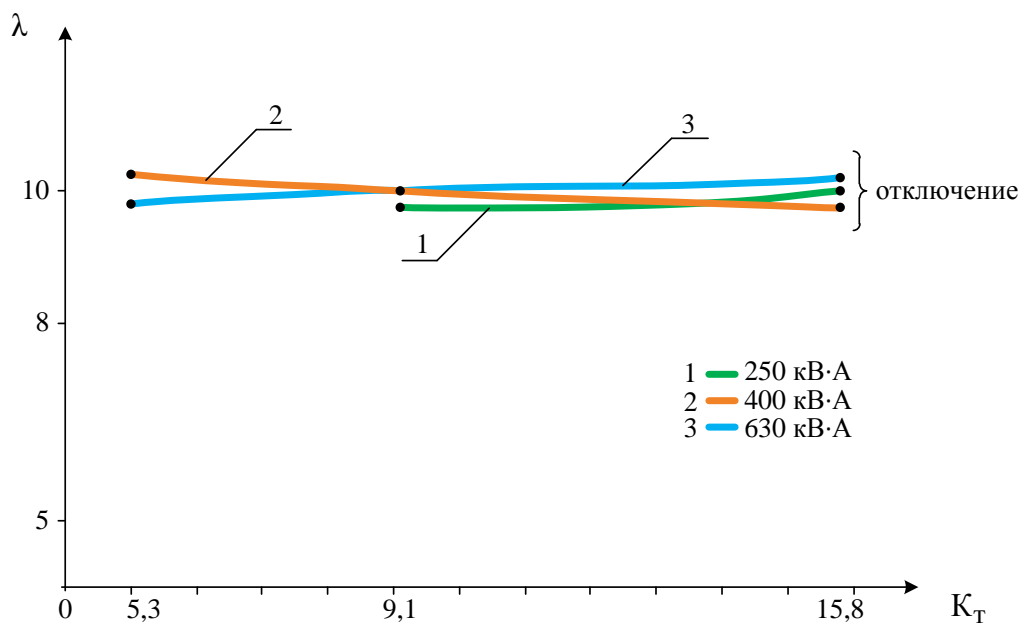


Рисунок 4 - Зависимость отношения кратности КП, возникающий в обмотке низкого и высокого напряжения от коэффициента трансформации трансформаторов 6/0,4; 6/0,69 и 6/1,14

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 3 и 4, показывает, что значение коэффициента  $\lambda$  находится в диапазоне 9,8 – 10,2 и не зависит от мощности трансформатора и коэффициента трансформации. Это указывает на то, что большая часть энергии волны КП, возникающей в обмотке ВН, передается в обмотку НН трансформатора при его отключении от сети и вызывает высокие перенапряжения на зажимах обмотки НН трансформатора. Передача энергии волны КП осуществляется за счет емкостных связей между обмотками,

а не за счет коэффициента трансформации. Данное обстоятельство необходимо учитывать, как при моделировании перенапряжений, возникающих при отключении силовых трансформаторов, так и при выборе способов и средств защиты от КП и мест их установки.

В третьей главе разработана и идентифицирована компьютерная модель системы «источник питания – выключатель – кабельная линия трансформатор». Установлены основные зависимости кратности перенапряжений в симметричном и неполнофазном режиме работы сети от мощности силовых трансформаторов и угла коммутации.

Апробация существующих схем моделирования трансформаторов, представленных в программах MatLab и MultiSim, показала, что она не отражает переходные процессы, возникающие в обмотках трансформатора при его коммутации, так как не учитывают емкостные связи между обмотками ВН и НН.

С учетом результатов экспериментальных исследований была разработана схема моделирования трансформатора в режиме коммутации, учитывающая емкостные связи между обмотками трансформатора.

В качестве примера на рисунке 5, при помощи программы MultiSim, приведена схема моделирования для трансформатора 6/0,4 кВ с литой изоляцией и мощностью 250 кВ·А, где  $L_1, L_5, L_9$  и  $R_1, R_5, R_9$  – индуктивности и активные сопротивления обмоток ВН трансформатора;  $L_4, L_8, L_{12}$  и  $R_1, R_5, R_9$  – индуктивности и активные сопротивления обмоток НН трансформатора;  $L_{10}, L_{11}, L_2, L_3, L_6, L_7$  и  $R_{10}, R_{11}, R_2, R_3, R_6, R_7$  – индуктивности и активные сопротивления цепей намагничивания трансформатора;  $C_1, C_4, C_7$  – емкости между обмотками ВН и НН;  $C_2, C_5, C_8$  – емкости обмоток ВН по отношению к земле;  $C_3, C_6, C_9$  – емкости обмоток НН по отношению к земле;  $R_{14}, R_{15}, R_{16}$  – сопротивления изоляции обмоток НН по отношению к земле;  $R_{15}, R_{16}$  – шунты.

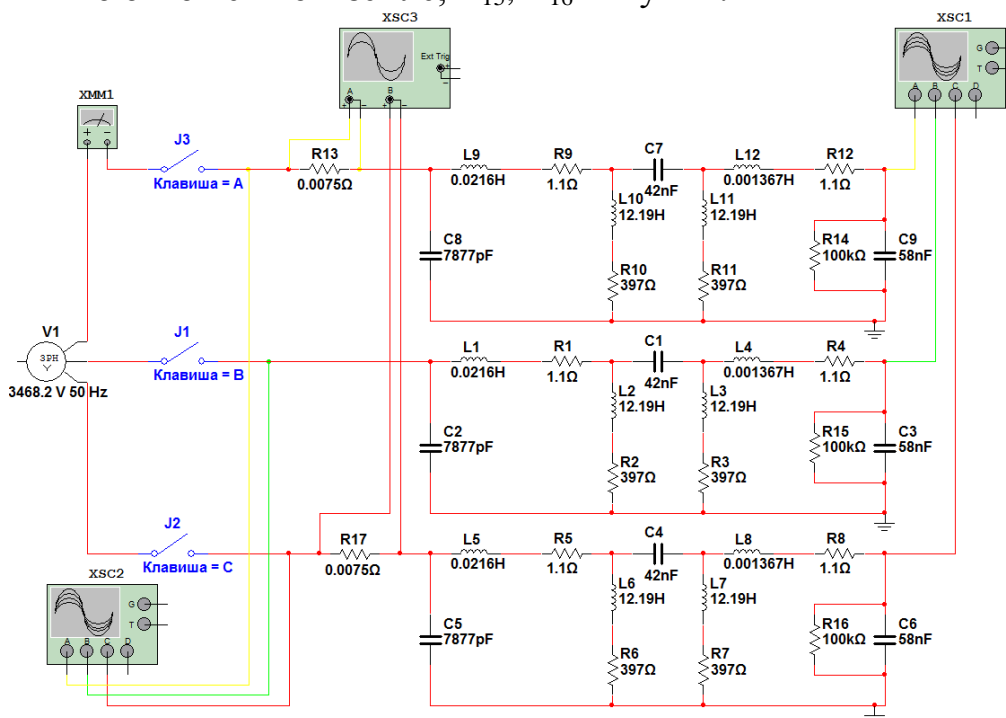


Рисунок 5 - Схема моделирования трансформатора 6/0,4 мощностью 250 кВ·А в режиме коммутации

Параметры обмоток и цепей намагничивания трансформатора определены по известным методикам, изложенным в курсе «Электрические машины», а емкости обмоток по отношению к земле и между обмотками ВН и НН определялись экспериментальным путем. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Емкостные связи трансформаторов

$S_T$ , кВ·А	Емкость фазной обмотки ВН по отношению к земле, нФ	Емкость фазной обмотки НН по отношению к земле, нФ	Емкость между обмотками ВН и НН, нФ
250	7,877	58,0	42,0
400	10,979	95,2	67,0
630	15,6	67,0	48,0
1000	40,1	115,6	80,0

Моделирование коммутационных режимов проводилось для трансформаторов мощностью 250, 400, 630, 1000 кВА, как для наиболее часто используемых в шахтах и рудниках.

Моделирование показало, что в нормальном режиме эксплуатации сети максимальные кратности перенапряжений возникают при углах коммутации  $27^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $81^\circ$  и  $90^\circ$  и не зависят от коэффициента трансформации и мощности трансформатора.

В случае обрыва одной из фаз сети кратность КП возрастает с увеличением угла коммутации. Данная зависимость имеет практически линейный характер, при этом кратность перенапряжений в неполнофазном режиме превышает кратность перенапряжений в нормальном режиме эксплуатации трансформатора не более чем на 18%.

Обобщенные результаты моделирования представлены на рисунке 6.

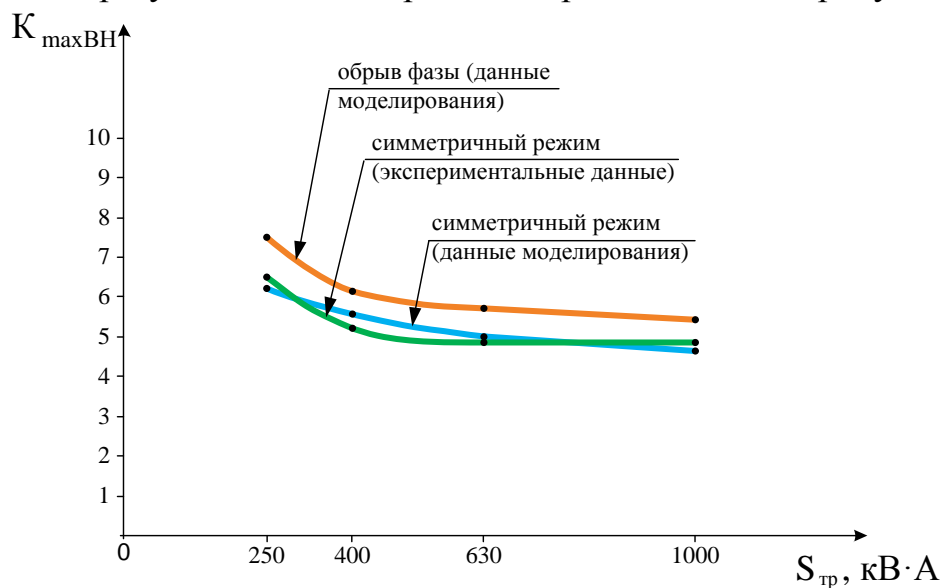


Рисунок 6 - Зависимости  $K_{\maxВН}$  от мощности трансформаторов, полученные на основе моделирования и экспериментальных данных

Анализ данных зависимостей показывает, что в симметричном режиме эксплуатации сети перенапряжения, возникающие при отключении силовых трансформаторов, в реальных условиях эксплуатации практически совпадают с результатами моделирования, относительная погрешность не превышает 10%. Следовательно, зависимости максимальных кратностей перенапряжений от мощности силовых трансформаторов в неполнофазном режиме работы сети, полученные на основе моделирования, можно считать близкими к реальным значениям и использовать их для прогнозирования КП в сетях 6 кВ шахт и рудников.

**В четвертой главе** выполнен анализ существующих методов оценки и прогнозирования КП в сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий. Обоснованы и предложены методы оценки КП в сетях 6 кВ шахт и рудников.

На основе анализа существующих методов оценки КП, к которым относятся экспериментальный метод, методы математического и физического моделирования, метод на основе регрессионных уравнений, экспресс-метод и комплексный метод прогнозирования перенапряжений и с учетом показателей качества электрической энергии были обоснованы методы оценки и прогнозирования КП применительно к условиям шахт и рудников.

Для систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников наиболее приемлемым является экспресс-метод оценки КП, разработанный научными сотрудниками ООО «Рутас» совместно с представителями кафедры электрификации горно-металлургического производства СФУ. Это связано с тем, что в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников не используются кабели из сшитого полиэтилена и практически отсутствуют высшие гармоники тока и напряжения, так как коэффициенты искажения несинусоидальности кривой тока и напряжения соответственно не превышают 2% и 5%. Это связано с тем, что в системах электроснабжения 6 кВ шахт и рудников наиболее часто используются трансформаторы мощностью 1000 кВА и менее, которые характеризуются высокой степенью подавления высших гармоник.

В то же время значительная протяженность подземных выработок и использование современного мощного технологического оборудования (проходческие и добычные комплексы, конвейерные линии и т.д.) приводит к тому, что отклонения напряжения в удаленных точках системы электроснабжения 6 кВ могут достигать предельно-допустимых значений, а в определенных случаях превышать их. Это обстоятельство заставляет рассматривать вопрос, связанный с использованием распределительных сетей напряжением 10 кВ. Перспективное использование сетей 10 кВ в шахтах и рудниках позволит не только решить проблему с отклонением напряжения, но и поставить задачу, связанную с подавлением высших гармоник в сетях 10 кВ, так как распределительные сети 10 кВ делают экономически обоснованным увеличение мощности технологического оборудования, в котором широко используются частотно-регулируемые приводы и тиристорные преобразователи. Это в свою очередь приведет к массовому использованию трансформаторов 1600 кВА и более, что снизит эффект подавления высших гармоник силовыми трансформаторами.

В этом случае для оценки КП в сетях 10 кВ шахт и рудников более рациональным является комплексный метод прогнозирования КП, который учитывает класс напряжения сети и наличие высших гармоник.

Результаты исследования, представленные во второй главе, показывают, что изменение кратности КП в зависимости от мощности электродвигателей, которые используются в общепромышленных сетях и сетях шахт и рудников, практически совпадают (рисунок 1) и не превышают 3,5 %. В то же время изменение кратности перенапряжений в зависимости от мощности сухих трансформаторов, эксплуатируемых в общепромышленных сетях 6 кВ и сетях 6 кВ шахт и рудников, не совпадают (рисунок 2). Кратность перенапряжений при коммутации трансформаторов в подземных условиях вакуумными выключателями выше в среднем на 28,5%. Следовательно, для оценки и прогнозирования КП в сетях 6 - 10 кВ шахт и рудников при использовании экспресс – метода и комплексного метода, коэффициент максимальной кратности ( $K_{max}$ ) для электродвигателей остается неизменным, а для трансформаторов должен быть выше в 1,285 раза.

В этом случае, как показывает практика, отличие расчетных значений КП в сетях 6 кВ шахт и рудников от измеренных КП не превышает 9,5%.

**В пятой главе** выполнен анализ эффективности существующих способов и устройств защиты от коммутационных перенапряжений. Предложен способ ограничения КП на основе компенсации реактивной мощности. Выполнено моделирование предложенного способа ограничения КП применительно к силовым трансформаторам 6 кВ. Произведены экспериментальные исследования в данном направлении на действующих трансформаторных подстанциях шахт и рудников.

Показано, что наличие «зоны замирания» в работе ОПН и низкая термическая устойчивость в режиме однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) снижает эффективность защиты от КП трансформаторов и электродвигателей, эксплуатируемых в шахтах и рудниках.

РС-ограничители снижают кратность КП до уровня  $(1,5 \div 1,7)U_n$ , что обеспечивает надежную защиту электродвигателей и трансформаторов от КП. Однако в режиме ОЗЗ один РС-ограничитель увеличивает емкостной ток ОЗЗ от 0,33А до 0,82А в зависимости от параметров РС-цепей, которые являются базовыми элементами РС-ограничителя. Это обстоятельство накладывает ограничения на количество данных устройств, подключенных к узлу электрической нагрузки, что может оставить часть электроприемников без защиты от КП. Кроме этого, РС-ограничители могут подвергаться термическому разрушению от токов высших гармоник, если коэффициент искажения синусоидальности кривой тока более 10%.

РС-гасители более устойчивы к воздействию токов высших гармоник и не влияют на величину и характер тока ОЗЗ. Однако имеют большие габариты и вес, что затрудняет их использование в шахтах и рудниках. Наиболее рационально их использовать для защиты высоковольтных электродвигателей от КП.

Работа данных устройств основана на способах, связанных с изменением электрических параметров защищаемых объектов. ОПН снижают активное сопротивление по отношению к земле, а RC-ограничители и RC-гасители увеличивают емкость обмоток электродвигателей и трансформаторов соответственно по отношению к земле и между собой.

Другим направлением в ограничении КП являются способы, снижающие величину среза тока.

В настоящее время это достигается за счет специальных сплавов при изготовлении контактов вакуумных выключателей.

В диссертации предложен способ защиты трансформаторов, основанный на снижении величины среза тока за счет компенсации индуктивной составляющей. Это связано с тем, что максимальные кратности КП наблюдаются при отключении трансформаторов в режиме холостого хода или близком к нему. В этом случае ток, протекающий по обмотке ВН, будет иметь в основном индуктивный характер. Наложения на ток холостого хода трансформатора емкостной составляющей приведет к снижению величины тока в обмотке ВН и, как следствие, к снижению среза тока в случае отключения трансформатора от сети.

Практическая реализация данного способа ограничения КП была осуществлена на базе автоматически регулируемых конденсаторных установок (КУ), предназначенных для компенсации реактивной мощности и подключенных к обмотке НН трансформатора. При этом датчик регулирования коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ) подключен к обмотке ВН через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

На рисунке 7 приведена электрическая схема модернизированной КУ, предназначенная для компенсации реактивной мощности и защиты трансформатора от КП.

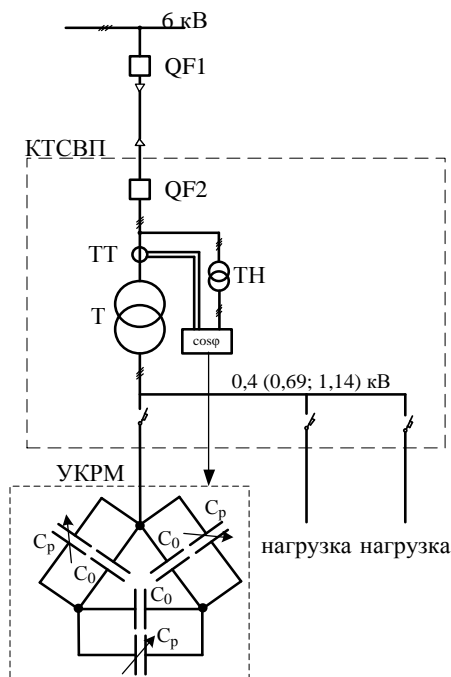


Рисунок 7 – Схема модернизированной автоматически регулируемой конденсаторной установки, предназначенной для компенсации реактивной мощности и защиты трансформатора от КП, где  $C_p$  – регулируемая емкость,  $C_0$  – постоянная емкость

Отличие модернизированной КУ от типовой состоит в наличии постоянно включенной первой ступени, емкость которой ( $C_0$ ) выбирается из условия максимальной компенсации индуктивной составляющей тока холостого хода трансформатора.

В результате компьютерного моделирования и экспериментальных исследований получены зависимости максимальных кратностей КП от коэффициента мощности трансформатора.

Усредненная зависимость  $K_{\max BH} = f(\cos\varphi)$ , представлена на рисунке 8.

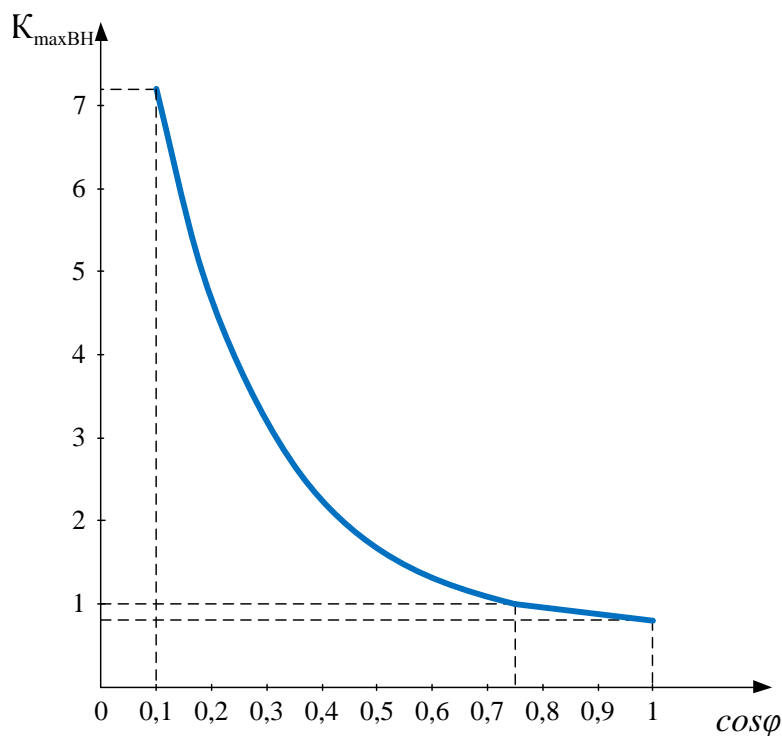


Рисунок 8 – Зависимость  $K_{\max BH} = f(\cos\varphi)$

Из данной зависимости видно, что при  $\cos\varphi > 0,75$  кратность КП не превышает 1, т.е. перенапряжения при коммутации трансформаторов не возникают.

Однако с позиции увеличения пропускной способности КЛ и трансформаторов  $\cos\varphi$  должен быть не менее 0,92. В этом случае наблюдается полное подавление КП при отключении трансформаторов.

В качестве примера на рисунках 9 и 10 показаны осциллограммы КП, возникающие при отключении трансформатора мощностью 250 кВА, если  $\cos\varphi$  соответственно равен 0,3 и 0,92.

В первом случае ( $\cos\varphi = 0,3$ ) кратность КП в обмотках ВН и НН соответственно составили 4,6 и 34,7, что может привести к пробоям изоляции обмоток трансформатора. Во втором случае ( $\cos\varphi = 0,92$ ) КП не возникают, что подтверждает высокую эффективность разработанного способа ограничения КП.

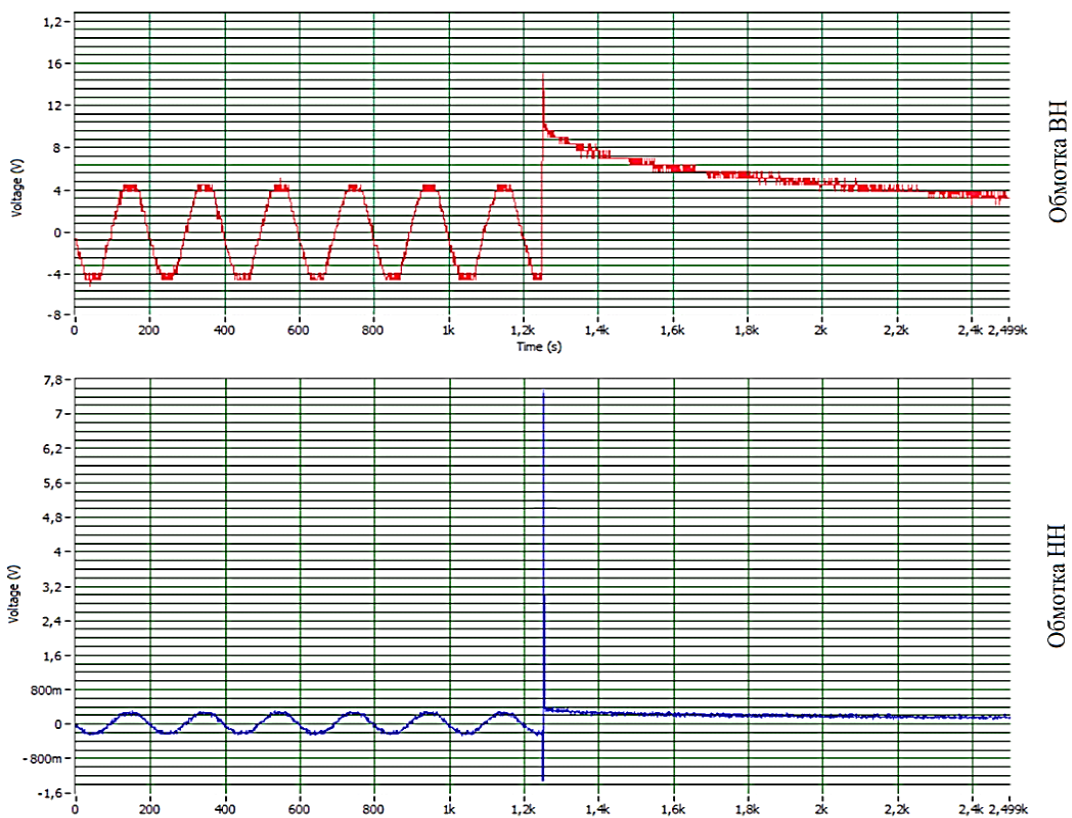


Рисунок 9 - Осциллограммы КП, возникающие при отключении силового трансформатора мощностью 250кВ·А.  $\cos\varphi=0,3$ ;  $K_{\max\text{ВН}}=4,6$ ;  $K_{\max\text{НН}}=34,7$

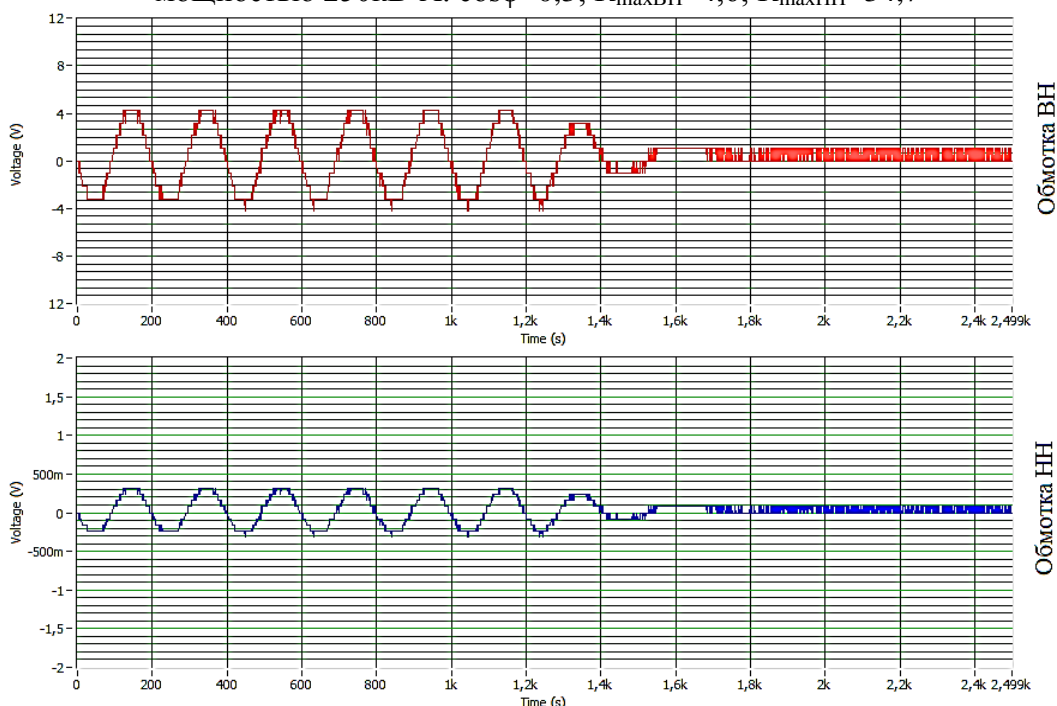


Рисунок 10 - Осциллограммы КП, возникающие при отключении силового трансформатора мощностью 250кВ·А.  $\cos\varphi=0,92$ ;  $K_{\max\text{ВН}}=0,7$ ;  $K_{\max\text{НН}}=0,75$ .

С 2009г. три модернизированных КУ (рисунок 7) эксплуатируются совместно с трансформаторами 6/0,69 кВ мощностью 630 кВА в рудничных сетях Нюрбинского ГОКа. Опыт эксплуатации показал, что аварийных ситуаций, связанных с пробоями изоляции обмоток трансформаторов и разделок кабелей, подключенных к вводам трансформаторов, не наблюдалось. В то же время из



пяти трансформаторных подстанций, в которых для защиты от КП использовались ОПН, на трех трансформаторах наблюдались пробой изоляции разделки кабеля на вводе обмотки ВН. Пробой изоляции в среднем происходил один раз в 3,5 месяца, а на одном трансформаторе в 2010г. произошел пробой изоляции обмотки НН и только один трансформатор из пяти эксплуатируется без аварий.

Это доказывает высокую эффективность модернизированных КУ, предназначенных не только для компенсации реактивной мощности, но и для защиты трансформаторов от КП.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ аварийности систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников в период с 2006г. по 2010г. показал, что широкое использование вакуумных выключателей, современная компоновка передвижных трансформаторных подстанций и низкая эффективность средств защиты от КП привели к росту аварийности силовых трансформаторов в 1,2 – 1,9 раза в зависимости от мощности трансформатора, поэтому разработка эффективных средств защиты от КП силовых трансформаторов позволит повысить надежность систем электроснабжения шахт и рудников.

2. Результаты статистической обработки экспериментальных данных показали, что с увеличением мощности силовых трансформаторов и электродвигателей кратность КП снижается. Кратность КП в обмотке НН трансформатора существенно превышает кратность перенапряжений в обмотке ВН и не зависит от коэффициента трансформации, а в неполнофазном режиме работы сети отключение силовых трансформаторов сопровождается перенапряжениями, величина которых по сравнению с нормальным режимом сети в среднем выше на 15 – 18%, что позволило обоснованно подойти к выбору схемы моделирования трансформатора в режиме коммутации и метода оценки КП в сети 6 кВ шахт и рудников.

3. Моделирование сухих трансформаторов мощностью 250, 400, 630 и 1000 кВА позволило установить изменение кратности КП от угла коммутации в зависимости от режима сети. Показано, что в нормальном режиме работы сети максимальные кратности перенапряжений возникают при следующих углах коммутации  $27^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $81^\circ$  и  $90^\circ$ , а при обрыве одной из фаз сети с увеличением угла коммутации кратность КП возрастает, что в перспективе позволяет разработать средства ограничения КП основанные на контроле угла коммутации.

4. Установлено, что характер изменения отношений максимальных кратностей КП, возникающих в обмотках НН и ВН трансформатора, полученных на основе моделирования и экспериментальным путем практически совпадают (погрешность не превышает 10%), не зависит от мощности трансформатора и находится в диапазоне  $10 \div 10,6$ . Это указывает на то, что основная часть энергии, возникающая в трансформаторе после его отключения, передается из обмотки ВН в обмотку НН за счет емкостных связей, поэтому наиболее рациональной точкой подключения средств защиты от КП является ввод обмотки НН.

5. Анализ существующих методов оценки и прогнозирования КП в системах электроснабжения 6 – 10 кВ промышленных предприятий и выполненные исследования показывают, что для оценки КП в современных систем электроснабжения шахт и рудников наиболее приемлемым являются экспресс – метод оценки и прогнозирования КП, основанный на обработке и систематизации статистических данных полученных при коммутации электродвигателей и трансформаторов в сетях 6-10 кВ промышленных предприятий, а в случае использования в шахтах и рудниках распределительных сетей напряжением 10 кВ для оценки КП необходимо применять комплексный метод. Использование указанных методов в распределительных сетях 6 - 10 кВ шахт и рудников возможно с учетом того, что кратность перенапряжений при коммутации сухих трансформаторов выше в 1,285 раза по отношению к аналогичным трансформаторам, которые эксплуатируются в общепромышленных сетях.

6. Эффективную защиту от КП сухих трансформаторов в сети 6 кВ шахт и рудников можно реализовать на базе автоматически регулируемых устройств компенсации реактивной мощности, подключенных к обмотке НН с постоянной включенной первой ступенью, емкость которой выбирается из условия подавления КП, основанного на снижении величины тока холостого хода трансформатора за счет компенсации индуктивной составляющей. При этом с позиции увеличения пропускной способности системы электроснабжения 6 кВ шахт и рудников и подавления КП при коммутации трансформаторов коэффициент мощности в любом режиме работы трансформатора должен находиться в диапазоне 0,92 – 0,96.

7. На основе анализа существующих средств защиты электродвигателей от КП показано, что наиболее эффективным устройством защиты от КП высоковольтных электродвигателей шахт и рудников является RC-гаситель, так как он не влияет на величину тока ОЗЗ, устойчив к воздействию высших гармоник и обеспечивает уровень ограничения не более  $1,7 \cdot U_{н.}$ , что ниже допустимого значения.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Майнагашев, Р.А. Анализ аварийности в системе электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири [Текст] / Р.А. Майнагашев, С.В. Кузьмин, И.С. Зыков, К.П. Ящук // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. - №3. – С. 23 – 25.

2. Майнагашев, Р.А. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников [Текст] / Р.А. Майнагашев, Р.С. Кузьмин, В.В. Павлов, И.С. Зыков, В.В. Дементьев // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №2. – С. 31 – 33.

3. Майнагашев, Р.А. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий [Текст] / Р.А. Майнагашев, Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, С.В. Немков // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №4. – С.53 - 54.

В других изданиях и материалах научно-технических конференций:

1. Майнагашев, Р.А. Проблемы перенапряжений при использовании вакуумных коммутационных аппаратов [Текст] / Р.А. Майнагашев, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, Б.С. Заварыкин, И.В. Краснова // Сборник материалов международной научно-практической конференции: "Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота". ГОУ ВПО "ГУЦМиЗ". – Красноярск. – 2006. – С.283 – 287.

2. Майнагашев, Р.А. Исследование коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий в режиме однофазного замыкания на землю [Текст] / Р.А. Майнагашев, Е.В. Гаврилова, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 66 – 67.

3. Майнагашев, Р.А. Коммутационные перенапряжения в узлах электрических нагрузок напряжением 6 – 35 кВ металлургических предприятий и способы их эффективного ограничения [Текст] / Р.А. Майнагашев, В.А. Меньшиков, В.В. Дементьев, Д.В. Барышников // Сборник материалов I Международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 74 – 75.

4. Майнагашев, Р.А. Основные направления по снижению аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ промышленных предприятий [Текст] / Р.А. Майнагашев, Е.В. Гаврилова, И.С. Зыков, В.В. Дементьев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2008. – С.142 – 146.

5. Майнагашев, Р.А. Режим однофазного замыкания на землю и коммутационного перенапряжения в сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий [Текст] / Р.А. Майнагашев, Е.В. Гаврилова // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2008. – С.146 – 149.

6. Майнагашев, Р.А. Компенсация реактивной мощности за счет использования естественных средств [Текст] / Р.А. Майнагашев, Е.В. Гаврилова, И.С. Зыков, В.В. Дементьев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2008. – С.106 – 110.

7. Майнагашев, Р.А. Устойчивость силовых трансформаторов 6 - 35 кВ к коммутационным перенапряжениям [Текст] / Р.А. Майнагашев, Е.В. Гаврилова, В.В. Павлов, И.С. Кузьмин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2009. – С. 270 – 272.

8. Майнагашев, Р.А. Влияние высших гармоник на величину тока однофазного замыкания на землю в системах электроснабжения 6 -10 кВ [Текст] / Р.А. Майнагашев, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, И.С. Зыков // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2009. – С. 272 – 276.