

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
Высшего и профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи

Майнагашев Роман Александрович

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент С.В. Кузьмин

Красноярск - 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.2 Общие положения.....	12
1.2 Анализ аварийности систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников	14
1.2.1 Кабельные линии.....	15
1.2.2 Силовые трансформаторы.....	17
1.2.3 Электродвигатели.....	22
1.2.4 Высоковольтные ячейки.....	22
1.3 Анализ результатов исследований коммутационных перенапряжений	23
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ.....	33
2.1 Результаты обработки статистических данных о перенапряжениях, возникающих в обмотке высшего напряжения при коммутации силовых трансформаторов в симметричном режиме.....	34
2.2 Результаты обработки статистических данных о перенапряжениях, возникающих в обмотке низшего напряжения силовых трансформаторов при их коммутации в симметричном режиме. ....	39
2.3 Результаты обработки статистических данных при коммутации силовых трансформаторов в неполнофазном режиме. ....	44
2.4 Результаты обработки статистических данных при коммутации асинхронных электродвигателей.....	48
ВЫВОДЫ.....	52
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ «ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ - КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ – ТРАНСФОРМАТОР».....	54

3.1 Общие сведения и методика исследования.....	54
3.2 Обоснование схемы моделирования при отключении силовых трансформаторов .....	57
3.3 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 250 кВ·А.....	58
3.4 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 400 кВ·А.....	62
3.5 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 630 кВ·А.....	66
3.6 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 1000 кВ·А.....	70
3.7 Анализ полученных результатов.....	74
ВЫВОДЫ.....	76
4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КП В СЕТЯХ 6 кВ ШАХТ И РУДНИКОВ.....	77
4.1 Общие сведения. ....	77
4.1 Анализ существующих методов оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6-10 кВ.....	78
4.2.1 Математические, физические, экспериментальные, компьютерные методы моделирования и метод оценки КП на основе регрессионных уравнений.....	78
4.2.2 Экспресс - методы оценки коммутационных перенапряжений.....	84
4.2.3 Комплексный метод оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6 - 10 кВ.....	86
4.3 Обоснование и выбор метода оценки КП в сетях 6 кВ шахт и рудников .....	91
ВЫВОДЫ.....	95

5 РАЗРАБОТКА И ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ КП В СЕТЯХ 6 КВ ШАХТ И РУДНИКОВ .....	96
5.1 Общие сведения .....	96
5.2 Анализ существующих средств и устройств ограничения коммутаци- онных перенапряжений .....	100
5.2.1 Кабельные линии.....	100
5.2.2 Нелинейные ограничители перенапряжений .....	102
5.2.3 Устройства на базе RC-цепей – RC-ограничители и RC-гасители. ....	104
5.3 Ограничение коммутационных перенапряжений на основе компенса- ции реактивной мощности .....	109
5.3.1 Физические процессы, возникающие при отключении трансформа- торов с учетом компенсации тока холостого хода.....	109
5.3.2 Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований .....	111
5.4 Совершенствование установок компенсации реактивной мощности с учетом ограничения коммутационных перенапряжений.....	119
5.5 Результаты опытной эксплуатации усовершенствованных автомати- чески регулируемых конденсаторных установок.....	124
ВЫВОДЫ:.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	128
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	154

## Принятые обозначения и сокращения

АД – асинхронный двигатель

ВВ – Вакуумный выключатель

ВН – высокое напряжение

ДН – делитель напряжения

КП – коммутационные перенапряжения

МВ – масляный выключатель

НН – низкое напряжение

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю

ОПН – ограничитель перенапряжений нелинейный

ПП – переходной процесс

ПТП – передвижная трансформаторная подстанция

СД – синхронный двигатель

СЭС – система электроснабжения

ТП – трансформаторная подстанция

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** На современном этапе развития систем электроснабжения (СЭС) 6 кВ шахт и рудников широкое использование вакуумных выключателей, старение изоляции кабельных линий, трансформаторов и электродвигателей и недостаточная 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 указывает на то, 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 выключателей. 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

высоковольтной 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 ФГАОУ ВПО СФУ ИГДГиГ и приняты к внедрению на ОАО «СКЗ КВАР», которые являются 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 вакуум-

ными 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, 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 мощности, 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.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Выполнен анализ аварийности распределительных сетей и электрооборудования 6 кВ на шахтах и рудниках расположенных, в Сибири и на Урале. Проанализирован опыт эксплуатации средств и устройств ограничения коммутационных перенапряжений (КП). Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием КП в сетях 6 кВ шахт и рудников. Сформулированы задачи аналитических и экспериментальных исследований.*

### 1.2 Общие положения

Исследования КП в системах электроснабжения шахт и рудников были выполнены на примере угольных шахт Кузбасса, калийных рудников и рудников по добыче железной руды, расположенных в регионах Сибири и Урала. Условия эксплуатации распределительных сетей 6 кВ и высоковольтных электроприемников на шахтах и рудниках имеют много общего. В первую очередь отметим внешние факторы: влажность и температура окружающей среды, проведение буровзрывных работ, повышенная запыленность и ограниченные пространства по установке и расположению трансформаторных подстанций (ТП) и технологических комплексов.

В системе электроснабжения 6 кВ шахт и рудников используются практически однотипные кабели, высоковольтные коммутационные аппараты и передвижные ТП [8,32,89]. Основными электроприемниками являются передвижные трансформаторные подстанции (ПТП) типа ТСШВП и КТСВП 6/1,14; 6/0,66 и 6/0,4. На их долю приходится практически 83% от общего количества основных электроприемников, а на высоковольтные электродвигатели соответственно 17%. Средний возраст эксплуатации кабельных линий (КЛ) электродвигателей и трансформаторов шахт и рудников составляет 12-15 лет. Таким образом, шахты и рудники, расположенные в Сибири и на Урале, можно рассматривать, как единый объект для исследований.

Длительная эксплуатация высоковольтных КЛ, электродвигателей, ТП и негативное влияние внешних технологических факторов приводит к интенсивному старению изоляции электрооборудования и КЛ, что впоследствии приводит к электрическому пробое изоляции. За последние 8 лет наблюдался постоянный рост количества однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6 кВ шахт и рудников. По оценке авторов [53,94,42,53] доля ОЗЗ в общем числе аварийных ситуаций составляет 78-87%. В то время как до 2004 года на ОЗЗ приходилось не более 67% всех аварийных отключений [83,95,28,97].

Из-за низкой селективности защит от ОЗЗ, более 30% ОЗЗ переходит в 2-х и 3-х фазное короткое замыкание [45,55,53,54]. С 2004 года и по настоящее время системы электроснабжения шахт и рудников претерпевают серьезные изменения. На смену масляным и воздушным высоковольтным выключателям приходят современные вакуумные выключатели (ВВ), начаты работы по проектированию систем электроснабжения шахт и рудников на напряжение 10 кВ. Широко используется автоматическая компенсация емкостных токов ОЗЗ в сетях 6 кВ. Стоит отметить, что ведутся работы по замене устаревших КЛ и электродвигателей на новые. Однако аварийность систем электроснабжения шахт и рудников остается по-прежнему высокой.

Опыт эксплуатации ВВ и исследования в области КП показывают, что при отключении высоковольтных электродвигателей и трансформаторов возникают высокие уровни КП, способные привести к пробое изоляции КЛ, электродвигателей и трансформаторов [55,61,68,61]. Следовательно, современный анализ аварийности систем электроснабжения шахт и рудников необходимо выполнить с учетом внедрения ВВ. Данный анализ позволит выявить влияние КП на систему электроснабжения 6 кВ и определить наиболее слабые места в распределительных сетях, установить причину выхода из строя КЛ, высоковольтных электродвигателей и ТП. На основе данного анализа можно выработать стратегию, приводящую к повышению надежности систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников.

## **1.2 Анализ аварийности систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников**

Анализ аварийности систем электроснабжения шахт и рудников был выполнен на основе записей диспетчерских служб, связанных с аварийными отключениями, за период 2000 -2010г. Анализу подвергались системы электроснабжения 6 кВ: рудник «Октябртский» (ЗАО ЗФ Норильский никель), рудник Нюрбенского ГОКА (АО АЛРОСА), калийные рудники ОАО Урал калий и Березовская угольная шахта, расположенная в Кемеровской области.

В результате обработки и анализа свыше 2320 аварийных отключений за период с 2000 по 2010 гг, произошедших в сетях 6 кВ шахт и рудников, установлено, что в период 2000 – 2005гг количество аварийных отключений от общего числа составило 38%, а за период 2006 - 2010 - 62%. Рост аварийности за последние 5 лет увеличился в 1,6 раза.

В период с 2000 – 2005год в системах электроснабжения 6кВ шахт и рудников доля вакуумных выключателей не превышала 35%, в основном использовались масляные и воздушные выключатели. За последние 5 лет в системах электроснабжения шахт и рудников произошли следующие изменения: доля вакуумных выключателей, используемых в ячейках, достигла 73% от общего количества выключателей, используемых в сетях 6 кВ шахт и рудников, кроме передвижных трансформаторных подстанций (ПТП) типа ТСШВП начали применять ПТП типа КТСВП.

На рисунках 1.1 и 1.2 приведены распределения аварийности между кабельными линиями, трансформаторами, электродвигателями и высоковольтными ячейками.

Анализ данных, представлен на рисунках 1.1 и 1.2 показывает, что с внедрением вакуумных выключателей аварийность трансформаторов возросла почти в 2 раза, электродвигатели стали выходить из строя реже на 17%, аварийность кабельных линий снизилась на 24,5%, аварийность высоковольтных ячеек уменьшилась в 2,5 раза. Снижение аварийности кабельных линий

и электродвигателей связано с тем, что в период 2005-2010 года проводятся работы по замене КЛ с физическим износом на новые кабели, а основная масса электродвигателей прошла капитальный ремонт и частичную замену. Замена физически изношенных ячеек с масляными и воздушными выключателями на ячейки с вакуумными выключателями позволила обеспечить снижение аварийности в 2,5 раза.

Рассмотрим более детально аварийность каждого из элементов, представленных на рисунках 1.1; 1.2.

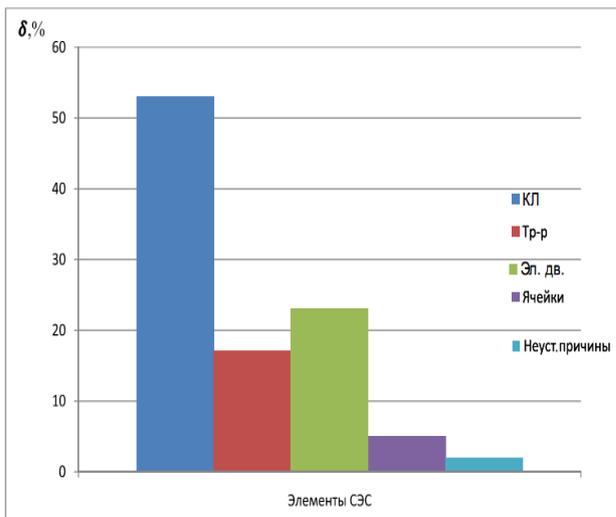


Рисунок 1.1 - Распределение аварийности в сетях 6кВ шахт и рудников между кабельными линиями, трансформаторами, электродвигателями и ячейками за период 2000÷2005год

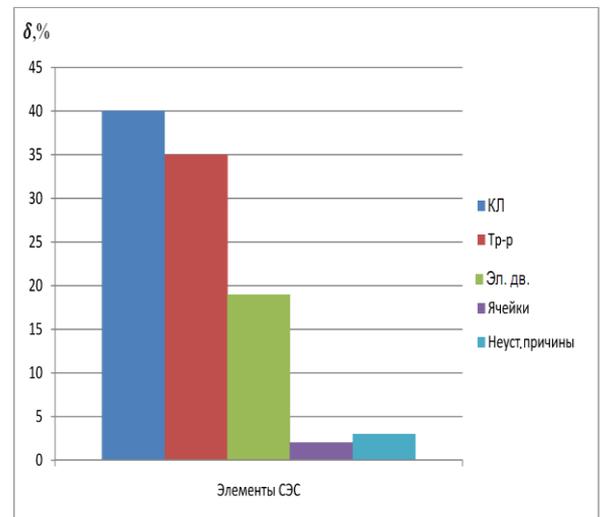


Рисунок 1.2 - Распределение аварийности в сетях 6кВ шахт и рудников между кабельными линиями, трансформаторами, электродвигателями и ячейками за период 2006÷2010год

### 1.2.1 Кабельные линии

Основными причинами аварийности кабельных линий являются: пробой изоляции разделки кабеля, пробой изоляции кабельной муфты, пробой изоляции кабеля и обрыв (перегорание) жилы кабеля.

В период эксплуатации с 2000–2005год процентное соотношение аварийности кабельных линий, по вышеуказанным причинам, соответственно составляет 34%,21%,13%,30%. В период эксплуатации 2006 – 2010г. указанные соотношения имеют следующий вид: 45%,12%,8%,32%. В 2 – 3% случа-

ях причину аварийности кабельных линий установить не удалось. Анализ представленных данных на рисунках 1.3 и 1.4 показывает, что с внедрением вакуумных выключателей обрыв или перегорание отдельных жил кабеля остались практически на прежнем уровне. Причины, приводящие к обрыву отдельных жил кабеля следующие: механическое воздействие при проведении буровзрывных работ или частичное обрушение породы. По указанным причинам наблюдается около 13% обрыва кабеля. Основной причиной связанной с обрывом кабеля, на долю которой приходится свыше 83%, является отгорание кабеля от зажимов выключателя или вводов трансформатора за счет повышенного переходного сопротивления.

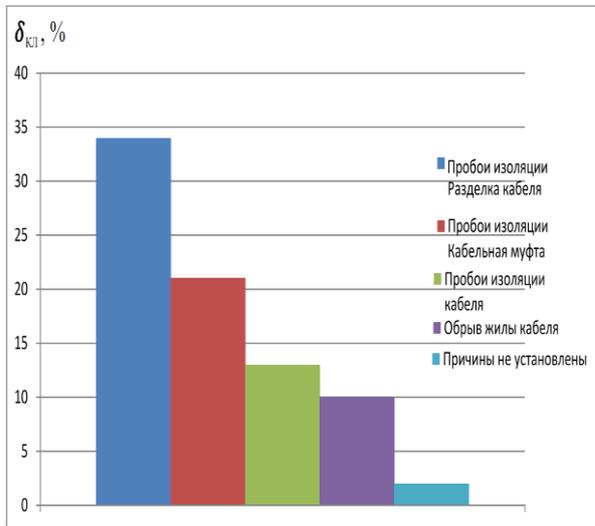


Рисунок 1.3 - Распределение основных причин аварийности кабельных линий за период эксплуатации 2000÷2005год

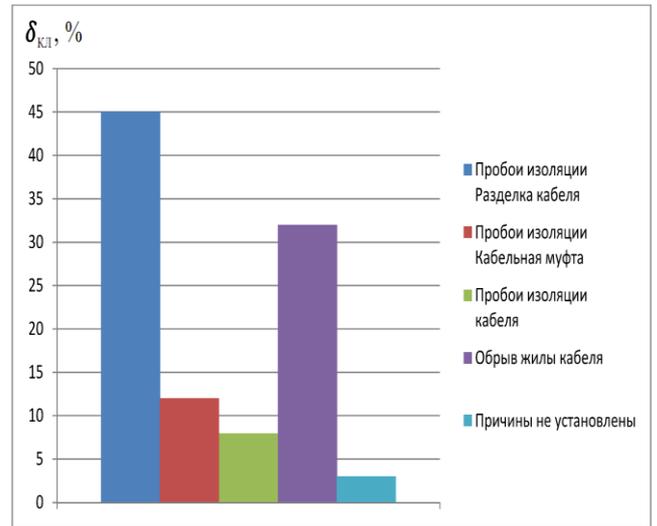


Рисунок 1.4 - Распределение основных причин аварийности кабельных

Использование вакуумных выключателей привело к росту пробоев изоляции разделок кабеля, при этом около 76% пробоев изоляции разделок кабеля происходит в месте соединения с вводами электродвигателей или трансформаторов. И только около 20% пробоев изоляции разделок кабеля происходит в месте соединения кабеля с выключателем. Отметим, что пробои изоляции разделок кабеля в последнем случае происходят, если длина кабельной линии между выключателем или электроприемником (электродвигатель, трансформатор), не превышает 50 метров. Замена физически изно-

шенных кабельных линий на новые, использование современных кабельных муфт, позволило снизить пробой изоляции кабелей с 21% до 12%, а повреждение кабельных муфт снизилось с 13% до 8%. Таким образом, на современном этапе эксплуатации кабельных линий в сетях 6 кВ шахт и рудников, с учетом широкого внедрения вакуумных выключателей, основными причинами аварийности кабелей являются: пробой изоляции разделок кабеля, обрыв или перегорание отдельных жил кабеля.

Согласно [30,61,51,78] максимальные коммутационные перенапряжения возникают при отключении электродвигателей и трансформаторов на их вводах.

Следовательно, можно предположить, что одной из основных причин пробоев изоляции разделок кабеля являются коммутационные перенапряжения, так как основная доля повреждения разделок кабеля приходится на соединения кабеля с вводами электродвигателей и трансформаторов.

### **1.2.2 Силовые трансформаторы**

Силовые трансформаторы типа ТСВ, ТСШВ, ТКШТ, ТКШВС, ТСП, ТСВР и ТСШ широко используются в подземных условиях.

Сухие взрывобезопасные трансформаторы типа ТСВ и ТСШВ применяются в качестве понижающих в шахтах, опасных по газу и пыли. Их конструкция состоит из корпуса различной формы с ребристой наружной поверхностью для охлаждения; ходовой тележки; выемной части (трансформатора); вводных коробок высокого и низкого напряжений. Ходовая часть трансформатора может быть выполнена на съемных салазках или скатах для колеи 600 или 900 мм.

Уровень взрывозащищенности трансформаторов РВ-4В, РВ-3В. Степень защиты трансформаторов от пыли и влаги не ниже IP54.

В угольных шахтах рудничные трансформаторы типа ТСВ заменили трансформаторы типа ТСШВ и широко используются в составе комплектных трансформаторных подстанций.

Трансформаторы серии ТКШТ, ТКШВС выпускались ранее. Их взрывозащищенность обеспечивалась за счет гашения электрической дуги кварцевым песком, которым наполнялся корпус трансформатора.

Трансформаторы типа ТСП используют в преобразовательных подстанциях для питания выпрямительных агрегатов АТП-500/275 и АТП-600/600 в шахтах, не опасных по газу и пыли. Исполнение данных трансформаторов – рудничное нормальное, конструкция аналогична конструкции трансформаторов ТСВ.

Трансформатор ТСВР-630/6-6 используют, как разделительный в протяженной электрической цепи в целях снижения емкостного тока ОЗЗ на отдельных участках системы электроснабжения 6 кВ (СЭС). Он предназначен для СЭС шахт, опасных по газу и пыли по внезапным выбросам угля и газа. Конструкция трансформатора аналогична трансформатору типа ТСВ.

Трансформатор ТСВР-630/6-6 выпускается в замен разделительного трансформатора ТСШВ-630/6-6 и имеет сравнительно меньшие потери мощности, габариты и массу.

Трансформаторы типа ТСШ используются в подземных электроустановках для питания сетей освещения и электроприемников напряжением 133/230 или 38В. Наибольшее распространение получили трансформаторы типа ТСШ 4/0,69 и ТСШ 4/0,4 с уровнем взрывозащиты РВ-3В.

Рассмотренные трансформаторы являются основой комплектных трансформаторных подстанций (КТП).

Стационарная или передвижная КТП представляет собой электрический агрегат, собранный из силового трансформатора, распределительных устройств высокого (РУ-ВН) и низкого (РУ-НН) напряжения, расположенных по обе стороны трансформатора, на общей ходовой тележке. В РУ-ВН помещен разъединитель или выключатель нагрузки, в РУ-НН расположен автоматический выключатель, устройство максимальной токовой защиты отходящих питающих линий и устройство защиты от тока утечки. Автоматиче-

ский выключатель заблокирован на опережающее отключение с коммутационным аппаратом РУ-ВН.

Основные типы передвижных КТП, которые эксплуатируются в шахтах и рудниках: ТСВП, ТШВП, КТПВ [52]. В последнее время на шахтах и рудниках используются передвижные КТП типа КТСВП. Отличие данной подстанции от вышеуказанных подстанций состоит в том, что высоковольтный ввод сухого трансформатора непосредственно соединен с вакуумным выключателем. Подобная компоновка передвижной КТП позволила значительно сократить количество электрических пробоев разделок кабелей, осуществляющих связь высоковольтной ячейки и трансформатора. Статистика показывает, что при подобной компоновке КТП количество пробоев разделов кабеля снижается в 4,5 раза.

КТП комплектуются сухими трансформаторами мощностью от 100 до 2000 кВ·А, реже встречаются КТП мощностью 3300 кВ·А [36].

Наибольшее распространение в системах электроснабжения шахт и рудников получили КТП мощностью 400, 630 и 1000 кВ·А. На долю данных КТП приходится около 69% от общего количества трансформаторов, эксплуатируемых в сетях 6 кВ рассматриваемых шахт и рудников. На КТП мощностью 1250 и 2000 кВ·А соответственно приходится 12% и 8% от общего количества рассматриваемых КТП, а на КТП мощностью 100, 160 и 250 кВ·А соответственно, приходится 2%, 3% и 6% от общего количества КТП.

Распределение аварийности силовых трансформаторов в зависимости от их мощности представлена на рисунках 1.5; 1.6. В период эксплуатации 2000–2005гг аварийность трансформаторов мощностью 100, 160, 250, 400, 630, 1000 и 1250 кВ·А от общего числа вышедших из строя трансформаторов одной мощности составила 3%, 6%, 7%, 11%, 8%, 5% и 3%, соответственно. За период 2006–2010год распределение следующее: 5%, 7%, 10%, 21%, 14%, 7% и 5%, соответственно.

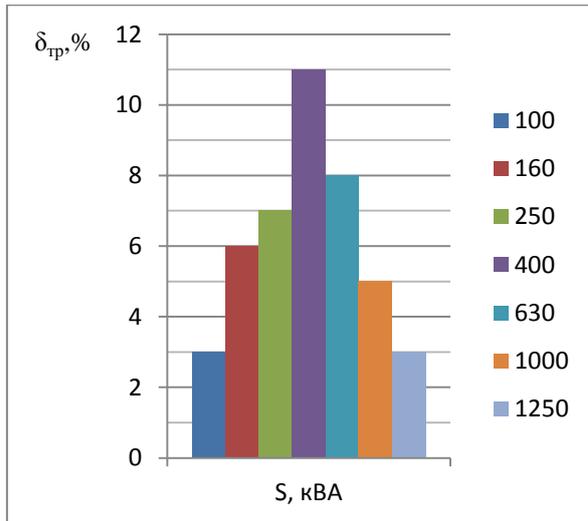


Рисунок 1.5 - Распределение аварийности от мощности силового трансформатора за период эксплуатации 2000÷2005год

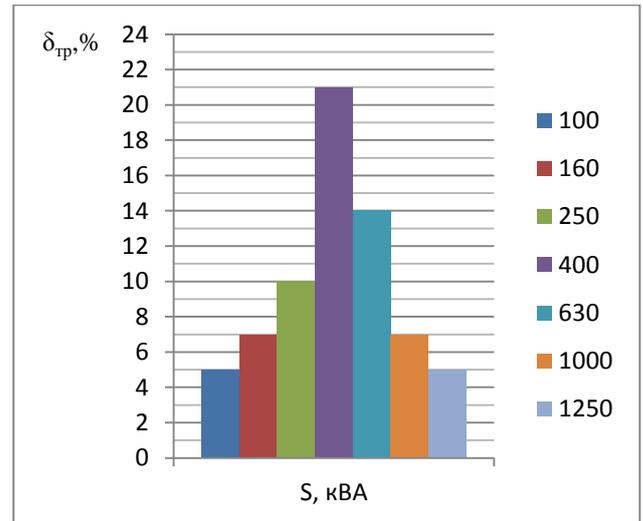


Рисунок 1.6 - Распределение аварийности от мощности силового трансформатора за период эксплуатации 2006÷2010год

С внедрением вакуумных выключателей аварийность силовых трансформаторов вышеуказанных мощностей соответственно возросла: 1,66; 1,17; 1,43; 1,9; 1,75; 1,4 и 1,67 раза. Анализ данных показывает, что наиболее повреждаемыми является трансформаторы мощностью 400 кВ·А. Основными причинами аварийности трансформаторов являются: пробой изоляции обмоток высокого напряжения (ВН), пробой изоляции обмоток низкого напряжения (НН), перекрытие вводов низкого напряжения, обрыв фазы (отгорание силового кабеля от высоковольтного ввода трансформатора), межвитковое замыкание обмоток ВН и обмоток НН. Процентное распределение между указанными причинами в период с 2000-2005 год следующее: 9%,13%,9%,39%,12% и 18% соответственно. За период с 2006-2010 год указанное распределение имеет вид: 16%,29%,14%,15%,10% и 16% соответственно.

Анализ указанных факторов показывает, что с внедрением вакуумных выключателей резко возрастает доля повреждений трансформаторов, связанных с электрическими пробоями изоляции на корпус и перекрытием низковольтных вводов трансформатора. Межвитковые короткие замыкания остались на прежнем уровне.

Настораживает тот факт, что число пробоев изоляции обмоток НН возросло в 2,2 раза, а перекрытие низковольтных вводов увеличилось в 1,6 раза. В то время как электрические пробой изоляции обмоток ВН возросли в 1,8 раза. Если объединить пробой изоляции обмоток НН и перекрытие низковольтных вводов трансформаторов, то аварийность по этим двум факторам возрастает практически в 2 раза.

Установлено, что пробой изоляции обмоток ВН и НН, перекрытие низковольтных вводов, а так же возникновение межвитковых коротких замыканий возникает при коммутации трансформаторов в режиме холостого хода или близким к нему.

Таким образом, можно предположить, что перенапряжения, возникающие при коммутации силовых трансформаторов вакуумными выключателями, являются одной из основных причин аварийности силовых трансформаторов на современном этапе развития систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников.

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.

Учитывая, что аварийность обмоток НН по сравнению с аварийностью обмоток ВН гораздо выше, так же можно предположить, что кратность КП возникающих на зажимах обмотки НН силового трансформатора будет выше, чем кратность КП на зажимах обмотки ВН. Указанные предположения требуют детального изучения, как на аналитическом, так и на экспериментальном уровне исследований КП.

### **1.2.3 Электродвигатели**

Анализ аварийности электродвигателей показывает, что использование вакуумных выключателей для коммутации электродвигателей не привело к росту аварийности последних. Статистика указывает на то, что аварийность электродвигателей снизилась с 23 до 19%, это связано с тем, что основная масса высоковольтных электродвигателей используется на водоотливе, а в период 2006 ÷ 2010 год основное кол-во двигателей прошли капитальный ремонт или были заменены на новые. Кроме этого в ячейках с вакуумными выключателями, предназначенными для коммутации, используются устройства защиты от коммутационных перенапряжений, что позволяет в определенной степени обеспечить защиту электродвигателей от КП [20,25,61].

### **1.2.4 Высоковольтные ячейки**

В системах электроснабжения 6кВ шахт и рудников применяются высоковольтные ячейки с номинальным током 400, 630 А. Для защиты от коммутационных перенапряжений используются RC- цепи или нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). RC-цепи используются для защиты электродвигателей от КП, а ОПН - для защиты силовых трансформаторов от КП.

Основными причинами выхода из строя ячеек с масляными или воздушными выключателями являются: отказ в работе привода, отгорание кабеля от вводов выключателя и термическое повреждение контактов выключателя. Первая причина связана с физическим износом выключателя из-за ограниченного коммутационного ресурса, а вторые две причины обусловлены нарушением технологии соединения выводов выключателя с кабелем, что приводит к образованию повышенного переходного сопротивления и росту температуры в месте соединения кабеля и выключателя.

Использование вакуумных выключателей в высоковольтных ячейках позволило увеличить коммутационный ресурс выключателя, что привело к снижению аварийности ячеек в 2,5 раза в 2010г по сравнению с 2005годом.

Таким образом, выполненный анализ аварийности показывает, что на современном этапе развития системы электроснабжения 6кВ шахт и рудников существует проблема высокой аварийности разделок кабелей, подключенных к вводам силовых трансформаторов и самих трансформаторов. Эта проблема обусловлена КП из-за широкого использования ВВ. Следовательно, для снижения аварийности системы электроснабжения 6 кВ шахт и рудников необходимо проанализировать результаты исследований в области перенапряжений, в первую очередь выполнить исследование КП, возникающих при коммутации силовых трансформаторов.

### **1.3 Анализ результатов исследований коммутационных перенапряжений**

Состояние изоляции электрооборудования шахт и рудников, определяющее надёжность работы и безопасность его обслуживания, во многом зависит от воздействующих на неё внешних и внутренних факторов. К внешним факторам, как было показано выше, относятся влажность, агрессивность среды, механические воздействия при проведении буровзрывных работ и естественное обрушение породы при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом. К внутренним факторам, в первую очередь, нужно отнести перенапряжения, возникающие в сетях 6 кВ в режиме ОЗЗ и при коммутации электрооборудования.

Перенапряжения в режиме ОЗЗ достаточно подробно изучены в следующих работах [27,7,50,83,10,96,45,69]. В работах [27,7] исследователями Джуварлы Ч.М. и Беляковым Н.Н. разработана современная теория описывающая возникновения перенапряжений при дуговых ОЗЗ. Доказывается, что кратность перенапряжений может превышать номинальное напряжение сети в 3-3,6 раза.

В работах [50,83] рассматриваются вопросы влияния режима нейтрали сети на величину и характер перенапряжений при ОЗЗ. Лихачев Ф.А. в своей работе [50] показывает, что при полной компенсации емкостных токов ОЗЗ

за счет дугогасящих реакторов можно добиться снижения перенапряжения в режиме ОЗЗ до уровня 2,5-2,8 от номинального напряжения сети.

Группа авторов во главе с профессором Серовым В.И. показывает, что наиболее эффективным способом ограничения перенапряжений является резистивное заземление нейтрали. В этом случае кратность перенапряжений не будет превышать значения 2,2 [83].

В работах [10,96] обосновываются современные принципы построения защит от ОЗЗ с учетом выбранного режима нейтрали сети 6-10 кВ и возможной динамики изменения емкостного тока ОЗЗ в зависимости конфигурации сети.

Авторы работ [45,60] доказывают, что для снижения аварийности сети 6-10 кВ горно-металлургических предприятий необходимо комплексное решение проблем, связанных с эффективным ограничением перенапряжений в режиме ОЗЗ и КП.

С физической точки зрения КП возникают при отключении индуктивной нагрузки трансформаторов или электрических двигателей.

Проблема КП была обнаружена на стадии исследований, направленных на использование вакуума в системах дугогашения выключателей.

На первоначальном этапе научных исследований основное внимание было направлено на изучение механизма возникновения среза тока и факторов, влияющих на его величину.

В работах [12,23,39] приводятся результаты исследований по данному вопросу. В этих работах показано, что срез тока возникает при отключении незначительных по величине токов нагрузки вследствие нестабильного горения дуги в вакуумной дугогасящей среде межконтактного промежутка коммутационного аппарата. Исследования выявили, что на процессы, ведущие к преждевременному обрыву тока, основное влияние оказывают теплофизические параметры контактных материалов выключателей.

В работах [12,23] приведены результаты исследования зависимости уровня тока среза от индуктивности нагрузки и напряжения питающей сети,

из которых видно, что ни индуктивность, ни напряжение не оказывают существенного влияния на уровень тока среза. Дальнейшие исследования подтвердили, что основное влияние на ток среза в выключателе оказывают контактные материалы [12]. Было определено, что снижения возникающего переходного напряжения вследствие преждевременного обрыва дуги можно добиться путем применения контактных материалов с продолжительным временем горения дуги, т.е. с применением мягких материалов.

Однако такой путь не всегда является приемлемым, так как необходимо учитывать взаимоисключающие требования к коммутационному аппарату: сваривание контактов, их износ и способность отключать большие токи. В то же время продолжающиеся научно-исследовательские работы в этой области позволили создать новые контактные материалы. Уровень тока среза таких контактов снизился в несколько раз. Например, в вакуумных коммутационных аппаратах напряжением 10 кВ с номинальным током до 400А используется сплав Fe(70%)-Cu(27%)-Bi(3%) марки ЖДВ, дающий максимальный ток среза  $i_{ср}=1\text{ А}$  (камера КДВ2-10/5/400УХЛ2) [38].

Для ранее выпускавшихся аналогичных коммутационных аппаратов максимальный ток среза равнялся 2,5А (камера КДВ-6/4004У2).

Одной из первых отраслей в нашей стране, где были внедрены первые вакуумные выключатели и начаты экспериментальные исследования перенапряжений при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумной коммутационной аппаратурой, является горнодобывающая промышленность. В работе [80] приведены результаты экспериментальных исследований перенапряжений, проведенных в 1975 году институтом ВНИИГидропром в Кузбассе. Измерения проводились при коммутации вакуумными выключателями электродвигателей типа ДАЗ мощностью 1500 кВт углесосных установок пульпоперекачивающей станции. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что максимальные перенапряжения имели следующие значения: в режиме рабочей нагрузки –  $2,2U_{фм}$  при токах среза не более 20А; в процессе пуска –  $1,8 U_{фм}$ ; в режиме холостого хода –  $2,94 U_{фм}$ .

Практически в тоже время в Красноярском институте цветных металлов им. М.И. Калинина совместно с представителями Канско-Ачинского теплоэнергетического комплекса были выполнены одни из первых измерения КП на сетевых высоковольтных электродвигателях экскаваторов. Измерения проводились на электродвигателях мощностью 520 кВт, 1250 кВт и 1500 кВт. В результате были получены следующие максимальные значения КП, для указанных двигателей  $6,5U_{фм}$ ;  $4,4U_{фм}$  и  $4,1U_{фм}$  [22,87,88,101,102].

Значительные расхождения в полученных результатах объясняются не совершенством методик и средств измерения.

Дальнейшие исследования в области КП были направлены на усовершенствование средств измерений и более глубокого изучения влияния основных физических факторов на величину КП: физический и виртуальный срез тока, повторное зажигание дуги в системе дугогашения выключателя и эскалация напряжения.

Для измерения КП использовались клидонограф, тениограф, пиковый вольтметр, лучевые осциллографы [79]. Для подключения указанных приборов, как правило, использовались измерительные трансформаторы напряжения, активные и емкостные делители напряжения. Использование указанных делителей и измерительных трансформаторов напряжения приводило к существенным отклонениям зафиксированных значений перенапряжений от реальных значений. Кроме этого, активные и емкостные делители напряжения обладали большими габаритами и весом, что затрудняло их использование в промышленных условиях.

Поэтому основная масса исследований в период с 1975г. по 1985г. производилась в лабораторных условиях и на основе математического моделирования.

В результате исследований было установлено, что срез тока характерен для выключателей любого применяющегося в настоящее время типа (маломасляных, электромагнитных, воздушных, вакуумных, элегазовых). Причиной среза тока в выключателях с гашением дуги в газовой среде являются

интенсивное дутье и развитие высокочастотных колебаний на спадающем участке синусоиды отключаемого тока [123]. Дутье вызывает значительное охлаждение плазмы в дуговом промежутке и быстрое уменьшение ее проводимости.

В вакуумных выключателях причиной среза тока является неустойчивость дуги при малых токах, так как она горит в парах металла контактов.

В вышеприведенных работах доказывается, что причиной возникновения КП кроме физического среза тока, многократных повторных зажигания дуги в дугогасительной системе выключателя может служить и виртуальный срез тока.

Виртуальный срез тока, как правило, возникает при многократных повторных зажиганиях дуги.

При повторном зажигании дуги в первой отключенной фазе выключателя появляется высокочастотный ток, который через паразитные емкости выключателя проникает в соседние фазы. В результате наложения данного тока на ток промышленной частоты, имеющего противоположную полярность, в этих фазах могут возникать срезы тока значением в сотни ампер.

Причиной возникновения КП может служить и эскалация напряжения. Это явление характерно только для вакуумных выключателей. Оно возникает крайне редко, только при отключении пускового тока не развернувшихся или заторможенных электродвигателей. Физическая сущность этого явления описана в работе [30]. Перенапряжения в этом случае могут достигать  $6 \div 8$  кратных значений.

Вероятность появления эскалации напряжения зависит от числа повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателей. В работе [43] показано, что эскалация напряжения возникает, если число зажигания дуги более 10.

Помимо изучения физических явлений, приводящих к возникновению КП, ряд исследователей занимались изучением влияния основных элементов системы электроснабжения на величину и характер КП [1,47,5,64].

Рассматривались следующие вопросы: влияние длины и сечения кабельной линии на величину КП при отключении электродвигателей и трансформаторов. Изучалось влияние типа и мощности электродвигателей и силовых трансформаторов на возможность возникновения КП при коммутации различными типами выключателей [5,64,17]. Детально изучалось влияние типа коммутационного аппарата на величину и характер КП. Последний вопрос в основном затрагивал вакуумные и масляные выключатели, так как в период с 1996г. по настоящее время происходит массовая замена масляных выключателей на вакуумные выключатели [5,45,64].

В работах [5,45,46] показано, что с ростом мощности электродвигателей и трансформаторов величина КП снижается. Например, максимальные кратности КП, зафиксированные для асинхронных электродвигателей мощностью 315, 500, 1250, 2500 кВт, соответственно равны 4,8; 4,5; 3,6; 2,8. Для масляных трансформаторов мощностью 250, 400, 630, 1000, 1600 кВ·А зафиксированы максимальные кратности КП, которые составляют 3,0; 2,5; 2,1; 1,7; 1,5. Данные результаты получены на основе обширных экспериментальных исследований, выполненных в период с 2000г. по 2006г., что позволило выявить влияние типа и мощности нагрузки, длины и сечения кабельной линии на величину КП в зависимости от типа выключателя: вакуумного и масляного.

В работе [19] приведены значения коэффициентов перенапряжения, определенных при отключениях воздушными и масляными выключателями в различных режимах работы электродвигателей мощностью 100 - 250 кВт, напряжением 6 кВ. Показано, что воздушные выключатели способствуют возникновению КП, величина которых в  $1,5 \div 1,7$  раза превышает КП, создаваемые масляными выключателями. Наибольшие перенапряжения были зафиксированы при отключении электродвигателей с заторможенным ротором.

В работе [5] предпринята попытка исследовать влияние технологических процессов на величину КП, возникающих при отключении электродвигателей и трансформаторов вакуумными и масляными выключателями. По-

казано, что технологические процессы на горнодобывающих, горно-перерабатывающих и металлургических предприятиях не влияют на величину и характер КП.

Группой исследователей изучено влияние работоспособности защит от ОЗЗ на величину КП. Низкая селективность защит от ОЗЗ приводит к необоснованному отключению неповрежденных линий и электроприемников, что вызывает появление максимально возможных КП, величина которых превышает номинальное напряжение сети в 8-9 раз. Это обстоятельство сопровождается повреждениями изоляции кабельных линий и электроприемников в режиме ОЗЗ [62,56].

Отметим, что вышеприведенный анализ работ по КП в основном посвящен результатам лабораторных исследований при создании вакуумных выключателей и результатам эксплуатации вакуумных и масляных выключателей на промышленных предприятиях не связанных с разработкой полезных ископаем подземным способом.

Исследования КП в системах электроснабжения 6 кВ шахт и рудников были начаты в конце 70-х, начале 80-х годов 20-го столетия. И проводились в научных институтах расположенных в центрах развития угольной промышленности: Донбасс – Украина, Кузбасс – Кемеровская область. В результате данных исследований была выполнена координация твердой изоляции электроустановок с уровнем КП. Было предложено определять значение одноминутного испытательного напряжения для изоляции рудничных трансформаторов и аппаратов, а так же для электродвигателей соответственно по формулам 1.1 и 1.2.

$$U_{\infty} = \frac{0,805 \cdot K_p \cdot U_{\text{НОМ}}}{K_{\text{И}} \cdot K_{\text{К}}} \quad (1.1)$$

$$U_{\infty} = \frac{0,7 \cdot K_p \cdot U_{\text{НОМ}}}{K_{\text{И}} \cdot K_{\text{К}}} \quad (1.2)$$

где  $K_p$  – расчетная или допустимая кратность КП,  $K_{\text{И}}$  – коэффициент импульса при воздействии КП,  $K_{\text{К}}$  – коэффициент кумулятивности, учитывающий старение изоляции в процессе эксплуатации.

В работе [65] доказывается, что для трансформаторов и электрических аппаратов  $K_n=1,3$  и  $K_k=0,85$ , для электродвигателей  $K_n=0,92$  и  $K_k=0,93$ .

Группой ученых во главе с профессором Эпштейном И.Я. [99,100] было доказано, что допустимая кратность перенапряжений для двигателей и трансформаторов напряжением 6 кВ, со сроком эксплуатации 5 лет и более, соответственно не должна превышать значений равных 1,8 и 2,8. С учетом этого, согласно формул 1.1 и 1.2, для условий шахт и рудников одноминутное испытательное напряжение трансформаторов не должно превышать 12,2 кВ, а для двигателей 8,8 кВ. Значение испытательного напряжения для электродвигателей является некорректным, так как соизмеримо с амплитудным значением сети, которое равно 8,5кВ. Поэтому в дальнейшем рационально использовать параметр, связанный с допустимой кратностью перенапряжений.

В работах института МакНИИ были выполнены экспериментальные исследования по изучению перехода волны коммутационного перенапряжения из сети 6 кВ в распределительную сеть 0,69 и 1,14 кВ через обмотку трансформатора. Доказывается, что кратности перенапряжений в обмотке НН превышают кратности перенапряжений обмотки ВН. В тоже время в работе А.И. Долгинова указывается, что перенапряжения с высокой стороны на низкую сторону передаются пропорционально коэффициенту трансформации или снижаются [66]. Таким образом, нет однозначного ответа о переходе перенапряжения из сети 6 кВ в низковольтную сеть через трансформатор. Принимая во внимание анализ аварийности трансформаторов, приведенный в разделе 1.2.2, можно предполагать, что результаты ученых МакНИИ являются наиболее достоверными, так как у трансформаторов обмотки НН выходят из строя чаще, чем обмотки ВН. Поэтому имеет смысл более детально изучить данный вопрос на экспериментальном уровне, что позволит корректно подойти к выбору средств защит трансформаторов от КП.

Авторами работ [66,82] доказывается, что в первую очередь необходимо защищать от КП часто коммутируемые электроустановки. Применительно

к условиям эксплуатации электрооборудования в сети 6кВ шахт и рудников наиболее часто коммутируются передвижные ТП. Число отключений трансформаторных подстанций типа ТСШВП 630-6/0,69 в год достигает 3000 включений и отключений. В то время, частота включений и отключений высоковольтных электродвигателей не превышает 50-ти раз. Следовательно, силовые трансформаторы и кабельные линии, связанные с силовыми трансформаторами, наиболее интенсивно подвергаются воздействию КП. На что указывает выполненный анализ аварийности электрооборудования: аварийность КЛ и трансформаторов в 3,9 раза выше, чем у электродвигателей [55].

Таким образом, при исследовании КП в сетях 6 кВ шахт и рудников, необходимо уделить особое внимание на изучение КП в системе «вакуумный выключатель – кабельная линия – трансформаторная подстанция» или в системе «вакуумный выключатель – трансформаторная подстанция». Последнее относится к передвижной трансформаторной подстанции типа КТСВП.

В настоящее время для ограничения КП в сетях 6 кВ шахт и рудниках используются в основном нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), которые устанавливаются в ячейках с вакуумными выключателями, а так же для защиты трансформаторов в ТП типа КТСВП используются RC-цепи с параметрами  $C = 0,1$  мФ и  $R = 50$  Ом.

Анализ аварийности, приведенный в разделе 1.2, показывает, что использование указанных средств защиты от КП для трансформаторов является не достаточно эффективным, так как аварийность трансформаторов в 2010 году по сравнению с 2005 годом возросла в 2,2 раза (см. рисунок 1.1 и 1.2).

Интенсивность пробоев обмоток трансформаторов или разделок кабеля, связанных с вводами трансформаторов резко возрастает, если коммутация происходит в неполнофазном режиме, то есть при обрыве одной из фаз сети. Исследования в данном направлении практически отсутствуют.

Следовательно, в настоящее время вопрос, связанный с эффективным ограничением КП в сетях 6 кВ шахт и рудников остается по-прежнему актуальным. Разработка эффективных методов и средств защиты, в первую оче-

редь силовых трансформаторов, позволит повысить надежность электропитания шахт и рудников и снизить простои технологического оборудования из-за аварий силовых трансформаторов.

Таким образом, целью настоящей диссертационной работы является повышение надежности и эффективности систем электропитания 6 кВ шахт и рудников на основе эффективного ограничения перенапряжений, возникающих при коммутации силовых трансформаторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи - выполнить экспериментальные исследования перенапряжений, возникающих при коммутации трансформаторов и электродвигателей в режиме холостого хода или близким к нему; на основе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования внести ясность о переходе волны перенапряжений с обмотки ВН в обмотку НН трансформатора и оценить их кратность; выявить закономерности и оценить кратности КП в неполнофазном режиме работы трансформатора (обрыв одной из фаз сети); обоснованно выбрать методику оценки и прогнозирования КП применительно к системам электропитания 6 кВ шахт и рудников; проанализировать работоспособность существующих средств защиты с помощью точечных экспериментов и в случае их недостаточной эффективности усовершенствовать существующие средства ограничения КП или разработать более эффективные средства и способы ограничения КП.

## **2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ**

*Приведены результаты измерений перенапряжений на высоковольтных асинхронных электродвигателях и силовых трансформаторах при их коммутации вакуумными выключателями. Выполнены экспериментальные исследования, отражающие переход волны перенапряжений из обмотки ВН в обмотку НН силового трансформатора. Показаны результаты измерений КП в неполнофазном режиме работы силовых трансформаторов. На основе статистической обработки экспериментальных значений доказывается, что в симметричном режиме работы сети кратность перенапряжений в обмотке НН превышает кратность перенапряжений в обмотке ВН. При обрыве одной из фаз сети 6 кВ кратность перенапряжений при отключении трансформаторов возрастает на 15÷18%.*

Экспериментальные исследования КП в сети 6 кВ шахт и рудников были выполнены на примере коммутации сухих силовых трансформаторов мощностью 160, 250, 400, 630 и 1000 кВ·А и асинхронных электродвигателей мощностью 250, 315, 400, 630, 800 и 1000 кВт. В результате было получено свыше 2600 значений КП.

Подобный статистический материал позволяет оценить влияние на величину КП таких факторов, как длина и сечение кабельных линий, тип и мощность электроприемника, характер нагрузки, а так же симметричный и неполнофазный режим работы сети.

На основе обработки статистических данных можно доказать закономерность появления максимально возможных значений кратности КП и использовать их в дальнейшем для оценки и прогнозирования КП в сетях 6 кВ шахт и рудников и обоснованно подойти к выбору необходимых устройств защиты от КП и мест их установки.

Методика измерения КП и обработки статистических данных подробно приведена в приложении 1.

## 2.1 Результаты обработки статистических данных о перенапряжениях, возникающих в обмотке высшего напряжения при коммутации силовых трансформаторов в симметричном режиме

Результаты измерений кратности КП при отключении сухих силовых трансформаторов мощностью от 160 до 1000 кВ·А в режиме холостого хода, эксплуатируемых в сетях 6 кВ ОАО «УралКалий» и АО «Алроса», представлены в таблице 2.1. Экспериментальные данные позволяют определить влияние типа передвижной трансформаторной подстанции (ПТП) и мощности трансформатора на величину КП, а так же определить, являются ли максимальные значения статистических выборок закономерной величиной.

Таблица 2.1 Результаты статистической обработки перенапряжений при отключении силовых трансформаторов в режиме холостого хода

Объект		Статистические данные				
		X	D	S	V	k <sub>max</sub>
1		2	3	4	5	6
1. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – ТСШВП-160/6; S=160кВ·А; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 20м.		5,347	0,73	0,854	0,16	6,6
K(Zi)	4,2; 4,8; 4,1; 3,9; 5,6; 5,3; 6,1; 6,6; 5,0; 4,9; 3,3; 5,7; 6,4; 6,6; 5,1; 5,5; 5,3; 6,1; 6,4; 6,2; 6,6; 4,3; 5,8; 5,2; 4,7; 5,7; 5,0; 5,2; 5,0; 5,8.					
2. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – ТСШВП-250/6; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.		4,98	0,652	0,807	0,162	6,1
K(Zi)	4,5; 5,6; 4,0; 4,2; 5,6; 5,8; 5,7; 6,1; 3,9; 4,8; 5,7; 4,0; 4,1; 4,7; 4,3; 5,6; 4,3; 6,0; 6,1; 4,8; 5,2; 5,9; 4,0; 3,9; 5,7; 4,3; 4,4; 6,1; 5,8; 4,3.					

Продолжение таблицы 2.1

1		2	3	4	5	6
3.ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – ТСШВП-400/6; S=400 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 15м.		4,767	0,368	0,606	0,127	5,7
К(Zi)	3,9; 4,5; 4,8; 5,3; 5,0; 5,7; 4,9; 5,5; 4,3; 4,2; 4,8; 5,2; 3,8; 4,8; 5,0; 5,2; 5,7; 4,4; 3,8; 4,6; 5,0; 5,7; 5,1; 4,7; 4,0; 4,4; 4,2; 3,7; 5,1; 5,7.					
4.ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТПВ-400/6; S=400 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		4,753	0,221	0,47	0,099	5,7
К(Zi)	5,6; 4,9; 4,7; 4,8; 5,1; 4,4; 4,7; 4,3; 4,9; 5,3; 4,6; 5,0; 5,7; 4,8; 4,3; 4,6; 4,6; 4,0; 5,6; 4,8; 4,5; 4,3; 4,8; 5,7; 4,2; 4,8; 4,6; 4,0; 4,2; 4,8.					
5.АО «Алроса», Нюрбенский ГОК , тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТСПВ-400/6; S=400 кВА.		4,763	0,376	0,613	0,129	5,7
К(Zi)	5,3; 4,8; 4,1; 4,0; 4,7; 5,6; 5,7; 4,9; 4,7; 4,1; 3,9; 5,2; 5,0; 5,7; 4,1; 3,8; 4,6; 5,2; 4,9; 5,7; 4,3; 4,7; 4,1; 5,2; 4,8; 4,0; 5,3; 5,7; 4,8; 4,0.					
6.ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – ТСВП-630/6; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		4,523	0,183	0,428	0,095	5,2
К(Zi)	4,3; 4,8; 5,0; 5,1; 4,4; 4,8; 4,7; 5,2; 4,0; 4,6; 4,0; 4,7; 3,9; 4,0; 4,6; 5,2; 4,4; 4,0; 3,8; 5,0; 5,3; 4,1; 4,8; 4,4; 4,6; 4,5; 4,0; 4,6; 4,7; 4,2.					
7.ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТПВ-630/6; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 15м.		4,513	0,204	0,452	0,1	5,2
К(Zi)	4,7; 4,0; 4,4; 4,4; 4,6; 5,0; 5,2; 4,3; 4,8; 3,9; 4,6; 4,2; 4,8; 3,9; 5,2; 4,1; 4,7; 4,0; 3,8; 4,3; 4,0; 5,1; 4,8; 4,2; 4,8; 5,2; 3,9; 4,4; 5,1; 5,0.					
8.АО «Алроса», Нюрбенский ГОК , тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТСПВ-630/6; S=630 кВА.		4,52	0,247	0,497	0,11	5,2
К(Zi)	4,3; 4,9; 4,2; 5,1; 4,8; 5,0; 5,2; 4,3; 3,9; 4,7; 4,0; 5,0; 4,8; 4,9; 4,0; 3,7; 4,7; 4,4; 5,2; 4,6; 4,2; 4,7; 5,2; 4,0; 3,7; 4,8; 4,1; 4,4; 3,6; 5,2.					
9.ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – ТСВП-1000/6; S=1000 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×70 длина 15м.		4,087	0,141	0,375	0,092	4,6
К(Zi)	4,4; 3,8; 3,7; 3,5; 4,0; 4,5; 4,1; 4,6; 3,8; 4,1; 4,4; 4,0; 3,3; 3,8; 4,5; 4,2; 4,6; 4,1; 3,4; 3,9; 4,2; 4,4; 3,9; 4,3; 4,0; 4,6; 4,1; 3,5; 4,3; 4,6.					
10.ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТПВ-1000/6; S=1000 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×70 длина 15м.		4,093	0,14	0,374	0,091	4,6
К(Zi)	4,0; 4,3; 3,8; 3,5; 4,6; 4,3; 4,2; 4,6; 3,6; 4,4; 4,0; 3,7; 4,0; 4,1; 3,7; 3,8; 4,1; 4,6; 3,9; 4,0; 4,6; 3,5; 3,8; 4,0; 4,5; 4,9; 4,0; 4,0; 4,6; 3,7.					

Для определения влияния типа ПТП на величину и характер КП необходимо сравнить выборки тех опытов и проверить их на однородность, у которых мощность трансформаторов, длина и сечение КЛ одинаковы. Если данные объединяются, то тип ПТП не влияет на величину КП, если же не объединяются, то тип ПТП влияет на величину и характер КП. Результаты проверки выборок на однородность представлены в таблицы 2.2.

Таблица 2.2 Проверка выборок на однородность для разных типов ПТП

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_s$	r	$\chi^2$	$P\{\chi^2\}$	
1	3 и 4	2,81	1,37	30	34,5	0,3	Возможно
2	4 и 5	2,09	1,43	30	36	0,22	Возможно
3	3 и 5	0,62	0,06	30	40	0,1	Возможно
4	6 и 7	2,6	0,29	30	33	0,36	Возможно
5	7 и 8	1,6	0,53	30	42	0,08	Возможно
6	6 и 8	0,82	0,82	30	39	0,13	Возможно
7	9 и 10	2,03	0,01	30	38	0,17	Возможно

Анализ данных таблицы 2.2 показывает, что для различных типов ПТП, в которых используются трансформаторы одной мощности, выборки объединяются. Это указывает на то, что тип ПТП при длине кабельной линии не более 20 метров не оказывает влияние на величину и характер КП при условии, что на рассматриваемых подстанциях используются трансформаторы одной мощности, которые коммутируются вакуумными выключателями.

Проверка выборок на экстремальность позволяет установить, является ли максимальные значения КП закономерной или случайной величиной. Случайная величина может возникать за счет ошибок измерений и из-за влияния помех. В таблице 2.3 приведены результаты проверок выборок на экстремальность для разных типов ПТП.

Таблица 2.3 Проверка выборок на экстремальность

Параметры		$\beta_m$	$\xi_m$	Сравнение критериев $\beta_m, \xi_m$	Принадлежность к генеральной совокупности	$Z_{\max}$
Номера опытов из таблицы 2.2.1	1	2,65	1,47	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,6
	2	2,65	1,39	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,1
	3	2,65	1,54	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,7
	4	2,65	2,01	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,7
	5	2,65	1,53	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,7
	6	2,65	1,58	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,1
	7	2,65	1,52	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,1
	8	2,65	1,37	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,1
	9	2,65	1,37	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	4,6
	10	2,65	1,35	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	4,6

Анализ данных таблицы 2.2.3. показывает, что зафиксированные максимальные значения принадлежат генеральной совокупности, то есть имеют закономерный характер. С увеличением мощности трансформаторов кратность КП снижается. Сопоставляя данные при коммутации силовых трансформаторов в сетях 6кВ с данными для аналогичных трансформаторов, эксплуатируемых на поверхности [63,55,61], получим зависимости, представленные на рисунке 2.1.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 2.4, показывает, что кратность перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов шахт и рудников превышает кратность КП при эксплуатации силовых трансформаторов, аналогичных по типу и мощности, в общепромышленных сетях на 27-30%.

На рисунке 2.2 приведены характерные осциллограммы при отключении силового трансформатора в симметричном режиме, возникающие на вводах обмотки высокого и низкого напряжений.

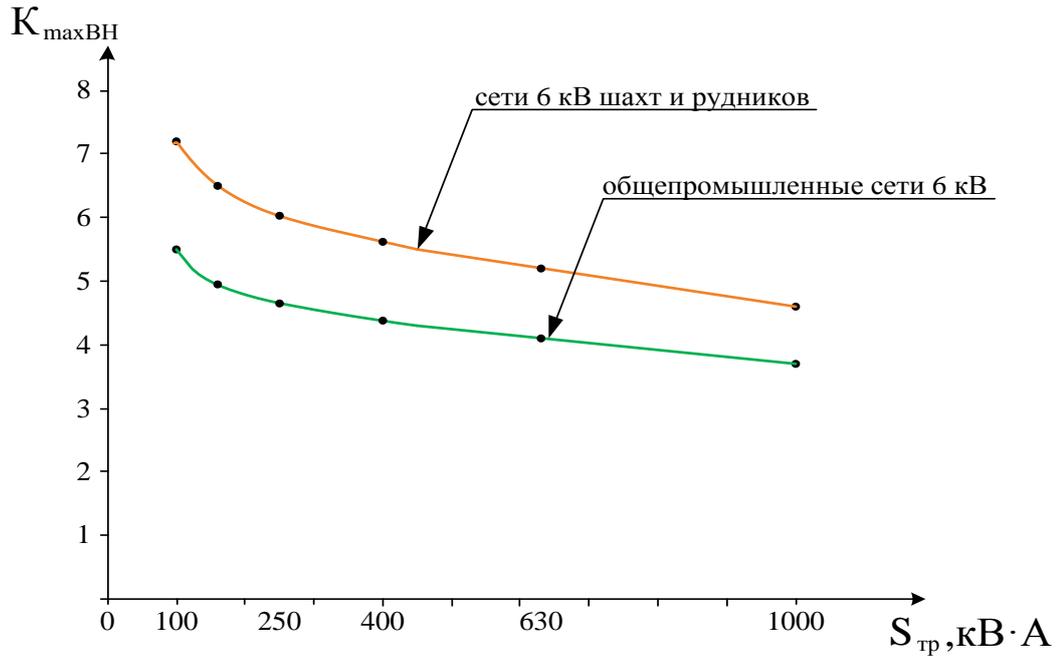


Рисунок 2.1 - Зависимость  $K_{\max}$  от мощности сухих трансформаторов.

Анализ характерных осциллограмм показывает, что кратности перенапряжений, при отключении трансформаторов, возникающие на вводах обмотки низшего напряжения (НН) превышают кратность перенапряжений возникающих на вводах обмотки высшего напряжения (ВН).

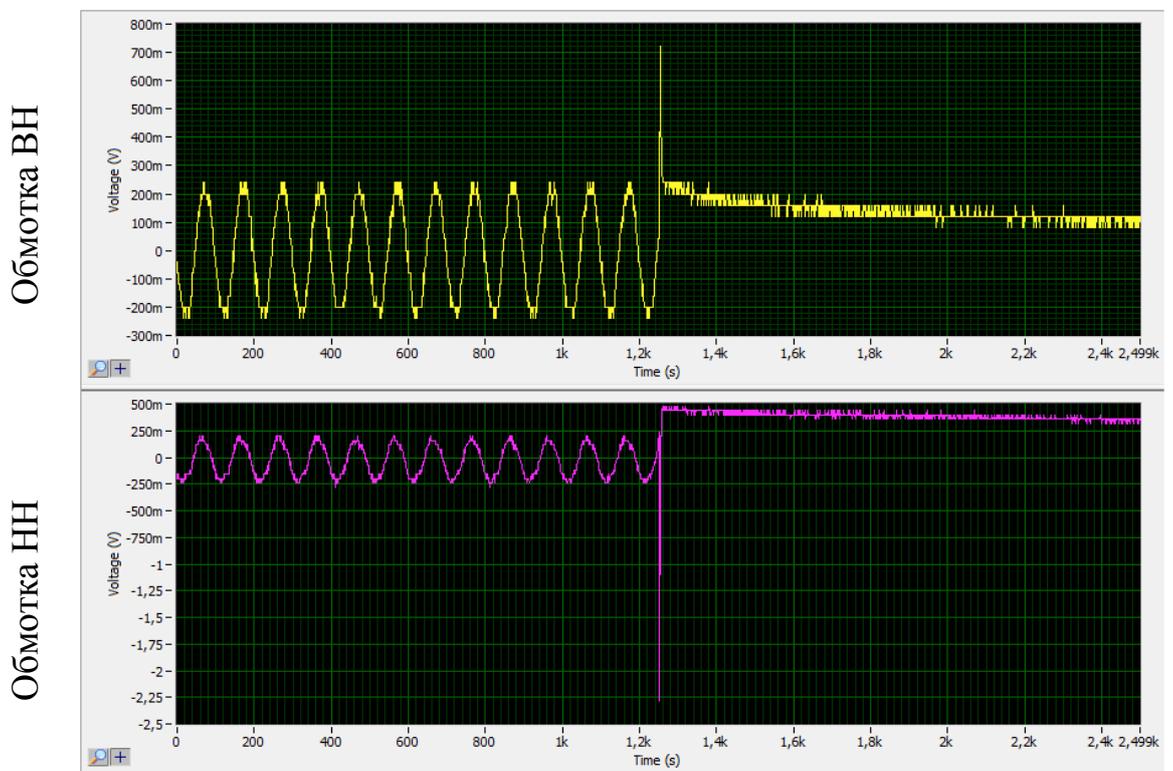


Рисунок 2.2 - Осциллограммы переходных процессов при отключении сухого трансформатора мощностью 250 кВ·А.

Остается открытым вопрос - как влияет коэффициент трансформации трансформатора на переход волны перенапряжения из обмотки ВН в обмотку НН. Данное влияние можно оценить с помощью статистических методов. Результаты указанных исследований приведены ниже.

## 2.2 Результаты обработки статистических данных о перенапряжениях, возникающих в обмотке низшего напряжения силовых трансформаторов при их коммутации в симметричном режиме.

Исследование КП, возникающих в обмотке низшего напряжения при коммутации силовых трансформаторов вакуумными выключателями, осуществлялась на трансформаторах мощностью 250, 400 и 630 кВ·А. При этом длина кабельной линии между вакуумным выключателем и трансформатором не превышала 20 метров. Результаты статистической обработки данных представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 Результаты статистической обработки перенапряжений возникающих в обмотке низкого напряжения при отключении силовых трансформаторов в режиме холостого хода

Объект		Статистические данные				
		X	D	S	V	$k_{max}$
1		2	3	4	5	6
1. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6/0,4; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25, 15м. $K_T=15,8$		49,75	65,07	8,067	0,162	60,9
K(Zi)	57,9; 43,0; 45,0; 55,9; 40,0; 42,0; 55,9; 57,9; 56,9; 60,9; 39,0; 48,0; 56,9; 40,0; 41,0; 47,0; 43,0; 55,9; 43,0; 59,9; 60,9; 48,0; 51,9; 58,9; 40,0; 39,0; 56,9; 43,0; 44,0; 60,9.					
2. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -250/6/0,69; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25, 15м. $K_T=9,1$		49,551	64,55	8,034	0,162	60,7
K(Zi)	44,8; 55,7; 59,7; 60,7; 39,8; 41,8; 55,7; 57,7; 56,7; 60,7; 38,8; 47,8; 56,7; 39,8; 40,8; 46,8; 42,8; 55,7; 42,8; 47,8; 39,8; 38,8; 51,7; 58,7; 56,7; 42,8; 43,8; 60,7; 57,7; 42,8.					

Продолжение таблицы 2.4

1		2	3	4	5	6
3. АО «Алроса», Нюрбенский ГОК , тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -400/6-0,4; S=400 кВА. $K_T=15,8$		47,538	37,401	6,116	0,129	56,9
K(Zi)	40,9; 51,9; 47,9; 39,9; 52,9; 52,9; 47,9; 40,9; 39,9; 46,9; 55,9; 56,9; 48,9; 46,9; 40,9; 38,9; 51,9; 49,9; 56,9; 40,9; 37,9; 45,9; 51,9; 48,9; 56,9; 42,9; 46,9; 56,9; 47,9; 39,9.					
4. АО «Алроса», Нюрбенский ГОК , тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -400/6-0,69; S=400 кВА. $K_T=9,1$		47,681	37,626	6,134	0,129	57,1
K(Zi)	38,0; 46,0; 52,1; 49,0; 57,1; 43,0; 47,0; 41,0; 52,1; 53,1; 48,0; 41,0; 40,0; 47,0; 56,1; 57,1; 49,0; 47,0; 41,0; 39,0; 52,1; 50,1; 57,1; 41,0; 48,0; 40,0; 53,1; 57,1; 48,0; 40,0.					
5. АО «Алроса», Нюрбенский ГОК , тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -400/6-1,15; S=400 кВА. $K_T=5,3$		47,671	36,057	6,005	0,126	57,2
K(Zi)	53,2; 48,1; 46,1; 52,2; 41,1; 40,1; 47,1; 56,2; 57,2; 49,1; 47,1; 41,1; 39,1; 52,2; 50,2; 54,0; 41,1; 38,1; 49,1; 57,2; 43,1; 47,1; 41,1; 52,2; 48,1; 40,1; 53,2; 57,2; 48,1; 40,1.					
6. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6-0,4; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50, 20м. $K_T=15,8$		45,263	17,628	4,199	0,093	52,2
K(Zi)	43,1; 48,1; 50,2; 51,2; 44,1; 48,1; 47,1; 52,2; 40,1; 46,1; 40,1; 47,1; 39,1; 40,1; 46,1; 52,2; 44,1; 40,1; 38,1; 50,2; 52,1; 41,1; 45,2; 44,1; 46,1; 45,1; 40,1; 46,1; 47,1; 42,1.					
7. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6-0,69; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50, 20м. $K_T=9,1$		45,151	17,784	4,217	0,093	51,9
K(Zi)	43,0; 48,0; 50,0; 50,9; 44,0; 48,0; 47,0; 51,9; 40,0; 46,0; 39,9; 47,0; 39,0; 40,0; 46,0; 51,9; 44,0; 46,0; 45,0; 44,0; 40,0; 38,0; 50,0; 51,9; 41,0; 48,0; 40,0; 46,0; 47,0; 42,0.					
8. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6-1,15; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50, 20м. $K_T=5,3$		45,159	16,707	4,087	0,091	51,7
K(Zi)	39,8; 45,8; 45,3; 46,8; 42,8; 47,8; 49,8; 50,7; 43,8; 47,8; 46,8; 51,7; 38,8; 39,8; 45,8; 40,8; 47,8; 43,8; 45,8; 44,8; 39,8; 45,8; 46,8; 51,7; 43,8; 39,8; 37,8; 49,8; 51,7; 41,8.					

На рисунке 2.3 приведены зависимости кратности перенапряжений, возникающих в обмотке НН, от мощности трансформаторов.

Максимальные значения кратности перенапряжений возникающих при отключении силовых трансформаторов получены на основе проверки выборок на экстремальность. Данные результаты представлены в таблице 2.5 и 2.6.

Анализ зависимости, представленный на рисунке 2.6, показывает, что кратности КП возникающие в обмотках НН уменьшается с ростом мощности трансформатора.

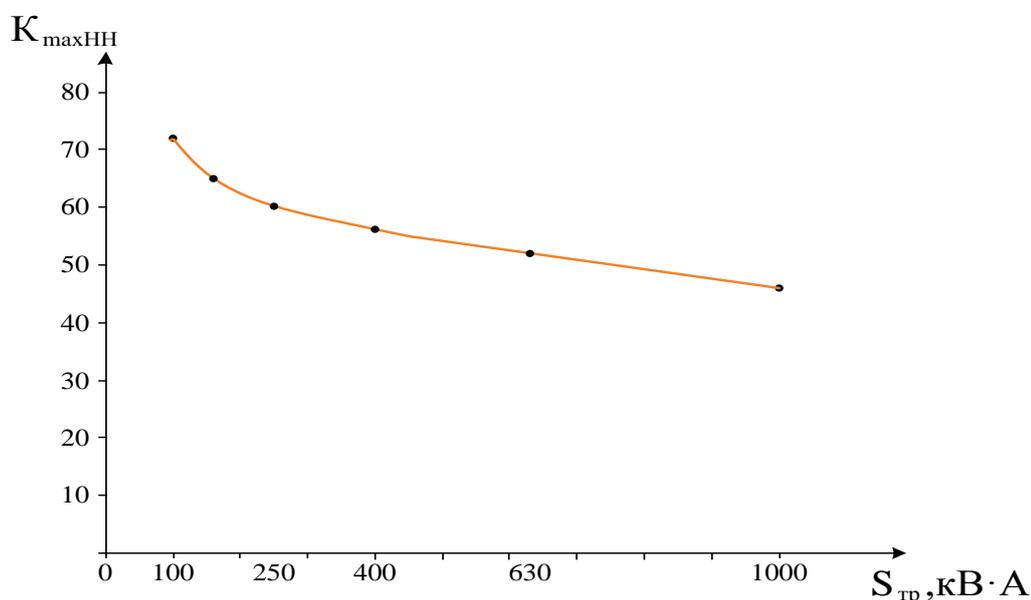


Рисунок 2.3 - Зависимость  $K_{\max}$  возникающих в обмотках НН от мощности сухих трансформаторов шахт и рудников.

Таблица 2.5 Проверка выборок на однородность для разных коэффициентов трансформации

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_s$	r	$\chi^2$	$P\{\chi^2\}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1 и 2	17,13	0,13	30	33	0,34	Возможно
2	3 и 4	23,37	0,14	30	37	0,19	Возможно
3	4 и 5	21,04	0,13	30	42	0,08	Возможно
4	3 и 5	44,39	0,27	30	35	0,26	Возможно
5	6 и 7	25,46	0,11	30	38,5	0,15	Возможно

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8
6	7 и 8	23,41	0,1	30	38	0,18	Возможно
7	6 и 8	48,84	0,21	30	39,5	0,12	Возможно

Проверка выборок на экстремальность позволяет установить являются ли максимальные значения КП, возникающие в обмотках НН трансформаторов, закономерной или случайной величиной. Случайная величина может возникать за счет ошибок измерений и из-за влияния помех. В таблице 2.6 приведены результаты проверок выборок на экстремальность для разных коэффициентов трансформации.

Таблица 2.6 Проверка выборок на экстремальность

Параметры		$\beta_m$	$\xi_m$	Сравнение критериев $\beta_m, \xi_m$	Принадлежность к генеральной совокупности	$Z_{max}$
Номера опытов из таблицы 2.3.1	1	2,65	1,38	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	60,9
	2	2,65	1,39	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	60,7
	3	2,65	1,53	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	56,9
	4	2,65	1,54	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	57,1
	5	2,65	1,59	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	57,2
	6	2,65	1,66	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	52,2
	7	2,65	1,6	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	51,9
	8	2,65	1,6	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	51,7

Анализ данных таблицы 2.6 показывает, что зафиксированные максимальные значения кратности перенапряжений принадлежат генеральной совокупности, то есть имеют закономерный характер.

Отношение максимальной кратности КП в обмотке НН к максимальным кратностям КП в обмотке ВН представим в виде выражения:

$$\lambda = \frac{K_{maxНН}}{K_{maxВН}}, \quad (2.1)$$

где –  $K_{maxНН}$  – кратность перенапряжений возникающих на зажимах НН,  $K_{maxВН}$  – кратность перенапряжений, возникающих на зажимах ВН.

Зависимость коэффициента  $\lambda$  от коэффициента трансформации представлена на рисунке 2.4. Анализ зависимостей, представленных на рисунке 2.4, показывает, что отношения кратностей КП, возникающих в обмотках ВН и НН, практически не зависят ни от мощности силового трансформатора, ни от коэффициента трансформации. Это указывает на то, что большая часть энергии волны КП, возникающей в первичной обмотке передается во вторичную обмотку трансформатора при его отключении от сети, и вызывает кратность перенапряжений на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Передача энергии волны КП осуществляется за счет емкостных связей между обмотками. 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.

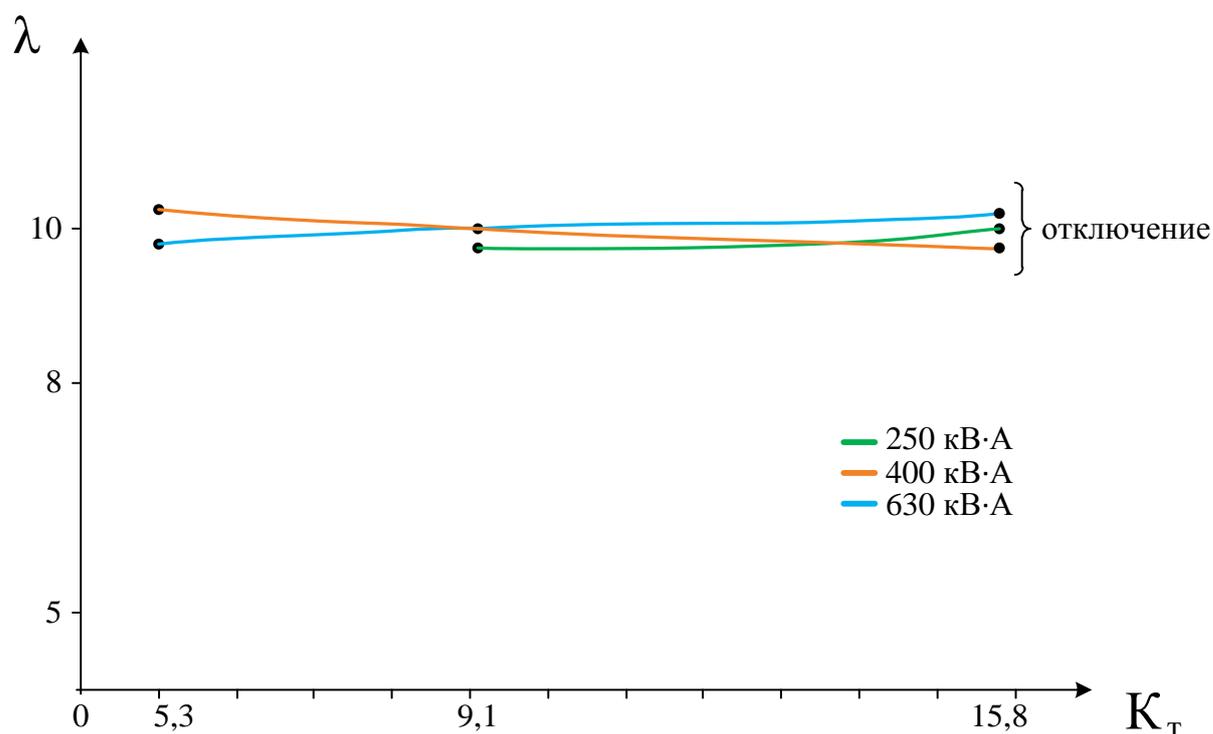


Рисунок 2.4 - Зависимость отношения кратности КП возникающих в обмотке низкого и высокого напряжения от коэффициента трансформации.

### 2.3 Результаты обработки статистических данных при коммутации силовых трансформаторов в неполнофазном режиме.

Анализ аварийности в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников показал, что на современном этапе развития систем электроснабжения, одной из основных причин аварийности кабельных линий является обрыв жилы кабеля [55]. По данной причине кабели выходят из строя в 32% случаев. Анализ аварийности так же показал, что при обрыве одной из фаз сети возрастает вероятность выхода из строя силовых трансформаторов. Исходя из этого можно предположить, что обрыв фаз сети приводит к тому, что поврежденная линия отключается, следовательно, высокая аварийность трансформаторов в неполнофазном режиме в первую очередь может быть связана с ростом кратности КП. Для подтверждения данного предположения были выполнены измерения кратности перенапряжений в неполнофазном режиме работы сети. Результаты статистической обработки перенапряжений, возникающих в обмотке ВН и в обмотке НН при отключении силовых трансформаторов в режиме холостого хода соответственно представлены в таблицах 2.7 и 2.8. Данные эксперименты были ограничены производственными условиями и высокой вероятностью выхода из строя силового трансформатора, поэтому исследования проводились на двух типах трансформаторов 250 и 630 кВ·А.

Таблица 2.7 Результаты статистической обработки перенапряжений возникающих в обмотке ВН при отключении силовых трансформаторов в неполнофазном режиме

Объект		Статистические данные				
		X	D	S	V	k <sub>max</sub>
1		2	3	4	5	6
1. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6-Y/Y-0; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.		5,869	0,896	0,947	0,161	7,2
K(Zi)	6,7; 5,1; 5,2; 7,2; 6,8; 5,3; 6,6; 4,7; 5,0; 6,6; 6,8; 6,7; 7,2; 4,6; 5,7; 6,5; 4,7; 4,8; 5,5; 5,1; 6,1; 7,0; 6,6; 5,1; 7,1; 7,2; 5,7; 4,7; 4,6; 5,1.					

Продолжение таблицы 2.7

1		2	3	4	5	6
2. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6-У/У; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.		5,88	0,91	0,954	0,162	7,2
К(Zi)	7,0; 4,7; 4,6; 5,3; 6,6; 5,5; 5,1; 6,7; 4,8; 4,9; 6,6; 6,8; 6,7; 7,2; 4,6; 5,7; 6,7; 4,7; 4,8; 5,1; 7,1; 7,2; 5,7; 6,1; 6,7; 5,1 ; 5,2; 7,2; 6,8; 5,1.					
3. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6-У/Δ; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.		5,886	0,885	0,941	0,16	7,2
К(Zi)	5,3; 6,6; 4,7; 5,0; 6,6; 6,8; 6,7; 7,2; 4,9; 5,7; 6,7; 4,7; 7,2; 6,8; 4,8; 5,5; 5,1; 6,6; 5,1; 7,1; 7,2; 5,7; 6,1; 7,0; 4,7; 4,6; 6,7; 5,1; 5,2; 5,1.					
4. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6- У/У-0; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		5,202	0,242	0,492	0,095	6,0
К(Zi)	4,9; 5,5; 5,8; 5,9; 5,1; 5,5; 5,4; 6,0; 4,6; 5,3; 4,6; 5,4; 4,5; 4,6; 5,3; 6,0; 5,1; 4,6; 4,4; 5,8; 6,1; 4,7; 5,5; 5,1; 5,3; 5,2; 4,6; 5,3; 5,4; 4,8.					
5. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6- У/У; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		5,19	0,27	0,519	0,1	6,0
К(Zi)	6,0; 4,7; 4,9; 4,6; 5,9; 5,5; 4,8; 5,4; 4,6; 5,1; 5,1; 5,3; 5,8; 6,0; 4,9; 5,5; 4,5; 5,3; 4,8; 5,5; 4,5; 5,4; 4,6; 4,4; 5,5; 6,0; 4,5; 5,1; 5,9; 5,8.					
6. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6- У/Δ; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		5,198	0,327	0,572	0,11	6,0
К(Zi)	5,6; 4,8; 5,9; 5,5; 5,8; 6,0; 4,9; 5,4; 5,1; 6,0; 5,3; 4,8; 4,9; 4,5; 5,4; 4,6; 5,8; 5,5; 5,6; 4,6; 4,3; 5,4; 6,0; 4,6; 4,3; 5,5; 4,7; 5,1; 4,1; 6,0.					

Таблица 2.8 Результаты статистической обработки перенапряжений возникающих в обмотке НН при отключении силовых трансформаторов в неполнофазном режиме

Объект	Статистические данные				
	X	D	S	V	k <sub>max</sub>
1	2	3	4	5	6
1. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6-У/У-0; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.	58,732	88,272	9,395	0,16	71,9
К(Zi)					

Продолжение таблицы 2.8

1		2	3	4	5	6
2. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6-У/У; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.		58,807	88,824	9,425	0,16	71,9
К(Zi)	53,0; 66,0; 47,2; 49,5; 66,0; 68,4; 67,2; 71,9; 46,0; 56,6; 67,2; 48,2; 48,3; 55,4; 50,7; 66,0; 52,7; 70,7; 71,9; 56,6; 61,3; 69,6; 47,2; 46,0; 67,2; 50,7; 51,9; 71,9; 68,4; 50,7.					
3. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП-250/6-У/Δ; S=250 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×25 длина 15м.		58,622	92,172	9,601	0,164	71,9
К(Zi)	53,0; 66,0; 47,2; 48,5; 66,0; 68,4; 67,2; 71,9; 46,0; 56,6; 67,2; 47,2; 48,3; 55,4; 50,7; 66,0; 50,7; 70,7; 71,9; 56,6; 61,3; 69,6; 47,2; 46,0; 67,2; 49,2; 51,9; 71,9; 68,4; 50,7.					
4. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6- У/У-0; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		52,001	23,45	4,843	0,093	60,0
К(Zi)	49,7; 55,5; 57,7; 58,8; 50,8; 55,8; 54,2; 60,0; 46,1; 53,4; 46,1; 54,2; 45,0; 46,1; 51,4; 60,0; 50,8; 46,1; 43,8; 57,7; 59,9; 47,3; 52,0; 50,8; 53,1; 51,9; 46,1; 53,1; 54,2; 48,4.					
5. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6- У/У; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		52,120	22,477	4,741	0,091	60,0
К(Zi)	49,6; 55,4; 57,7; 58,8; 51,1; 55,4; 54,2; 60,0; 48,3; 53,1; 46,1; 54,2; 45,2; 46,1; 53,3; 60,0; 50,8; 46,1; 43,8; 57,7; 59,9; 47,3; 52,0; 50,8; 53,1; 51,9; 46,1; 53,1; 54,2; 48,4.					
6. ОАО «УралКалий», тип выключателя - вакуумный, тип ПТП – КТВП -630/6- У/Δ; S=630 кВА; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 20м.		52,103	23,18	4,815	0,092	60,0
К(Zi)	51,4; 55,4; 57,7; 58,8; 50,8; 55,4; 54,2; 59,7; 46,7; 53,1; 46,1; 54,2; 44,8; 46,1; 53,1; 60,0; 52,3; 45,5; 43,8; 57,7; 59,9; 47,3; 51,1; 51,8; 53,1; 51,9; 46,1; 53,1; 54,2; 47,9.					

Проверка выборок на однородность, результаты которой приведены в таблицах 2.9 и 2.10 показывает, что кратность перенапряжений возникающих в обмотках высшего и низшего напряжений не зависит от группы соединения обмоток, так как выборки объединяются.

Таблица 2.9 Проверка выборок КП обмотки ВН на однородность для разных групп соединения обмоток трансформаторов

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_s$	r	$\chi^2$	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 2	1,37	0,04	30	39	0,13	Возможно
2	2 и 3	0,73	0,08	30	40	0,1	Возможно
3	1 и 3	2,11	0,04	30	38	0,16	Возможно
4	4 и 5	2,6	0,29	30	37	0,2	Возможно
5	5 и 6	1,6	0,53	30	36	0,24	Возможно
6	4 и 6	0,82	0,82	30	34	0,3	Возможно

Таблица 2.10 Проверка выборок КП обмотки НН на однородность для разных групп соединения обмоток трансформаторов

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_s$	r	$\chi^2$	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 2	0,91	0,02	30	43	0,07	Возможно
2	2 и 3	2,22	0,1	30	38	0,16	Возможно
3	1 и 3	1,33	0,12	30	39	0,13	Возможно
4	4 и 5	2,86	0,12	30	33	0,36	Возможно
5	5 и 6	0,43	0,08	30	41	0,09	Возможно
6	4 и 6	2,41	0,03	30	38	0,16	Возможно

Проверка выборок на экстремальность показывает, что максимальные значения КП, зафиксированные при отключении в неполнофазном режиме, имеют закономерный характер. Результаты проверки выборок на экстремальность представлены в таблицах 2.11 и 2.12. Сопоставляя данные 2.11 и 2.3 видно, что кратность перенапряжений при отключении трансформатора при неполнофазном режиме сети возрастает на 15-18 %.

Таблица 2.11 Проверка выборок на экстремальность для обмотки ВН

Параметры		$\beta_m$	$\xi_m$	Сравнение критериев $\beta_m, \xi_m$	Принадлежность к генеральной совокупности	$Z_{max}$
Номера опытов из таблицы 2.4.1	1	2,65	1,41	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	7,2
	2	2,65	1,38	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	7,2
	3	2,65	1,4	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	7,2
	4	2,65	1,62	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,0
	5	2,65	1,56	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,0
	6	2,65	1,4	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,0

Таблица 2.12 Проверка выборок на экстремальность для обмотки НН

Параметры		$\beta_m$	$\xi_m$	Сравнение критериев $\beta_m, \xi_m$	Принадлежность к генеральной совокупности	$Z_{max}$
Номера опытов из таблицы 2.4.2	1	2,65	1,4	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	71,9
	2	2,65	1,39	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	71,9
	3	2,65	1,38	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	71,9
	4	2,65	1,65	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	60,0
	5	2,65	1,66	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	60,0
	6	2,65	1,61	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	60,0

Для получения зависимости максимальной кратности перенапряжений от мощности силовых трансформаторов возникающих при отключении трансформаторов в неполнофазном режиме необходимо выполнить моделирование на базе современных компьютерных программ.

#### 2.4 Результаты обработки статистических данных при коммутации асинхронных электродвигателей

Результаты измерения кратности КП при отключении асинхронных электродвигателей мощностью от 250 до 1000 кВт, эксплуатируемых в сетях 6 кВ АО «Алроса» и рудника «Абазинский», принадлежавшего компании «Евразхолдинг», представлены в таблице 2.13. Экспериментальные данные позволяют определить влияние мощности асинхронного электродвигателя на величину КП, а так же ответить на вопрос: являются ли максимальные значения статистических выборок закономерной величиной.

Таблица 2.13 Результаты статистической обработки перенапряжений при отключении асинхронных электродвигателей

Объект		Статистические данные				
		X	D	S	V	$k_{max}$
1		2	3	4	5	6
1. АО «Алроса», тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – А112; Р=250кВт; тип КЛ – СБГ6-3×25, 25м.		5,747	0,73	0,854	0,149	7,0
K(Zi)	4,6; 5,2; 4,5; 4,3; 6,0; 5,7; 6,5; 7,0; 5,4; 5,3; 3,7; 6,1; 6,8; 7,0; 5,5; 5,9; 5,7; 6,5; 6,8; 6,6; 7,0; 4,7; 6,2; 5,6; 5,1; 6,1; 5,4; 5,6; 5,4; 6,2.					

Продолжение таблицы 2.13

1		2	3	4	5	6
2. АО «Алроса», тип выключателя - вакуумный, двигатель – А112; Р=315 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×25 , 20м.		5,497	0,682	0,826	0,15	6,6
К(Zi)	5,0; 6,6; 4,5; 4,7; 6,1; 6,3; 6,2; 6,6; 4,4; 5,3; 6,2; 4,5; 4,6; 5,2; 4,8; 6,1; 4,8; 6,5; 6,6; 5,3; 5,7; 6,4; 4,5; 4,4; 6,2; 4,8; 4,9; 6,6; 6,3; 4,8.					
3. АО «Алроса», тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – А114; Р=400 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 28м.		5,217	0,368	0,606	0,116	6,2
К(Zi)	4,4; 5,0; 5,3; 5,8; 5,5; 6,2; 5,4; 6,0; 4,8; 4,7; 5,3; 5,7; 4,3; 5,3; 5,5; 5,7; 6,2; 4,9; 4,3; 5,1; 5,5; 6,2; 5,6; 5,2; 4,5; 4,9; 4,7; 4,2; 5,6; 6,2.					
4. АО «Алроса», тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – А114; Р=400 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 120м.		5,203	0,221	0,47	0,09	6,2
К(Zi)	6,1; 5,4; 5,2; 5,3; 5,6; 4,9; 5,2; 4,8; 5,4; 5,8; 5,1; 5,5; 6,2; 5,3; 4,8; 5,1; 5,1; 4,5; 6,1; 5,3; 5,0; 4,8; 5,3; 6,2; 4,7; 5,3; 5,1; 4,5; 4,7; 5,3.					
5.АО «Алроса», Нюрбенский ГОК , тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – А114; Р=400 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×50, 60м.		5,213	0,376	0,613	0,118	6,2
К(Zi)	5,8; 5,3; 4,6; 4,5; 5,2; 6,1; 6,2; 5,4; 5,2; 4,6; 4,4; 5,7; 5,5; 6,2; 4,6; 4,3; 5,1; 5,7; 5,4; 6,2; 4,8; 5,2; 4,6; 5,7; 5,3; 4,5; 5,8; 6,2; 5,3; 4,5.					
6.Абазинский рудник, корпорация Евразхолдинг, тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – ВАО; Р=630 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×50 длинна 35м.		4,62	0,178	0,422	0,091	5,3
К(Zi)	4,4; 4,9; 5,1; 5,2; 4,5; 4,9; 4,8; 5,3; 4,1; 4,7; 4,1; 4,8; 4,0; 4,1; 4,7; 5,3; 4,5; 4,1; 3,9; 5,1; 5,4; 4,2; 4,9; 4,5; 4,7; 4,6; 4,1; 4,7; 4,8; 4,3.					
7. АО «Алроса», тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – асинхронный; Р=630 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×50 длина 144м.		4,613	0,204	0,452	0,098	5,3
К(Zi)	4,8; 4,1; 4,5; 4,5; 4,7; 5,1; 5,3; 4,4; 4,9; 4,0; 4,7; 4,3; 4,9; 4,0; 5,3; 4,2; 4,8; 4,1; 3,9; 4,4; 4,1; 5,2; 4,9; 4,3; 4,9; 5,3; 4,0; 4,5; 5,2; 5,1.					
8. АО «Алроса», тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – асинхронный; Р=630 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×50 , 15м.		4,62	0,247	0,497	0,108	5,3
К(Zi)	4,4; 5,0; 4,3; 5,2; 4,9; 5,1; 5,3; 4,4; 4,0; 4,8; 4,1; 5,1; 4,9; 5,0; 4,1; 3,8; 4,8; 4,5; 5,3; 4,7; 4,3; 4,8; 5,3; 4,1; 3,8; 4,9; 4,2; 4,5; 3,7; 5,3.					

Продолжение таблицы 2.13

9. Абазинский рудник, корпорация Евразхолдинг, тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – ВАО; P=800 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×95 , 15м.		4,487	0,141	0,375	0,084	5,0
K(Zi)	4,8; 4,2; 4,1; 3,9; 4,4; 4,9; 4,5; 5,0; 4,2; 4,5; 4,8; 4,4; 3,7; 4,2; 4,9; 4,6; 5,0; 4,5; 3,8; 4,3; 4,6; 4,8; 4,3; 4,7; 4,4; 5,0; 4,5; 3,9; 4,7; 5,0.					
10. Абазинский рудник, корпорация Евразхолдинг, тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – асинхронный; P=800 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×95 ,15м.		4,493	0,14	0,374	0,083	5,0
K(Zi)	4,4; 4,7; 4,2; 3,9; 5,0; 4,7; 4,6; 5,0; 4,0; 4,8; 4,4; 4,1; 4,4; 4,5; 4,1; 4,2; 4,5; 5,0; 4,3; 4,4; 5,0; 3,9; 4,2; 4,4; 4,9; 5,0; 4,4; 4,4; 5,0; 4,1.					
11. Абазинский рудник, корпорация Евразхолдинг, тип выключателя - вакуумный, тип электродвигателя – асинхронный; P=1000 кВт; тип КЛ – СБГ6-3×95 длина 18м.		4,193	0,233	0,483	0,115	4,7
K(Zi)	4,1; 4,4; 3,9; 3,6; 4,7; 4,4; 4,3; 4,7; 3,7; 4,5; 4,1; 3,8; 4,1; 4,2; 3,8; 3,9; 4,2; 4,7; 4,0; 4,1; 4,7; 3,6; 3,9; 4,1; 4,6; 5,0; 4,1; 4,1; 4,7; 3,8.					

Для определения влияния длины КЛ до асинхронного электродвигателя на величину и характер КП необходимо сравнить выборки тех опытов и проверить их на однородность, у которых мощность асинхронных электродвигателей и сечение КЛ одинакова. Если данные объединяются, то длина кабельной линии не влияет на величину КП. Если же не объединяются, то длина кабельной линии серьезно влияет на величину и характер КП. Результаты выборки проверки на однородность представленные в таблицы 2.14.

Таблица 2.14 Проверка выборок на однородность для разных типов асинхронных электродвигателей

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_s$	r	$\chi^2$	$P\{\chi^2\}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3 и 4	2,81	1,37	30	34	0,3	Возможно
2	4 и 5	2,09	1,43	30	37	0,2	Возможно
3	3 и 5	0,62	0,06	30	40	0,1	Возможно
4	6 и 7	2,6	0,29	30	35	0,28	Возможно

Продолжение таблицы 2.14

1	2	3	4	5	6	7	8
5	7 и 8	1,6	0,53	30	38	0,16	Возможно
6	6 и 8	0,82	0,82	30	39	0,13	Возможно
7	9 и 10	2,03	0,01	30	37	0,2	Возможно

Анализ таблицы 2.14 показывает, что кратность перенапряжений, возникающих на зажимах электродвигателя, не зависит от длины кабельной линии.

Проверка выборок на экстремальность позволяет установить, являются ли максимальные значения КП закономерной или случайной величиной. В таблице 2.15 приведены результаты проверок выборок на экстремальность для разных типов асинхронных электродвигателей.

Таблица 2.15 Проверка выборок на экстремальность для асинхронных электродвигателей

Параметры		$\beta_m$	$\xi_m$	Сравнение критериев $\beta_m, \xi_m$	Принадлежность к генеральной совокупности	$Z_{max}$
Номера опытов из таблицы 2.5.1	1	2,65	1,47	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	7,0
	2	2,65	1,34	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,6
	3	2,65	1,62	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,2
	4	2,65	2,12	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,2
	5	2,65	1,61	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	6,2
	6	2,65	1,58	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,3
	7	2,65	1,52	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,3
	8	2,65	1,37	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,3
	9	2,65	1,37	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,0
	10	2,65	1,35	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	5,0
	11	2,65	1,05	$\beta_m > \xi_m$	принадлежит	4,7

Анализ таблицы 2.15 показывает, что максимальные значения КП являются закономерной величиной.

Зависимость КП от мощности асинхронных электродвигателей, представлены на рисунке 2.5, и указывает на то, что с ростом мощности асинхронных электродвигателей кратности КП снижаются.

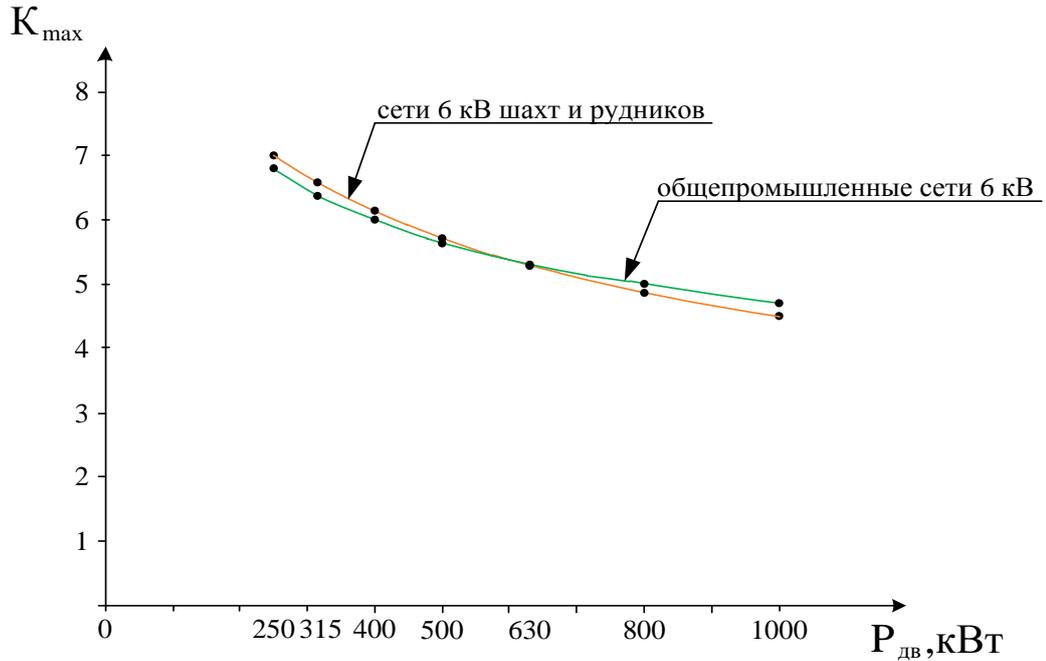


Рисунок 2.5 - Зависимость  $K_{max}$  от мощности асинхронных электродвигателей.

Сопоставив результаты измерений КП на зажимах асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых в сети 6 кВ шахт и рудников с аналогичными измерениями КП для общепромышленных сетей, видно, 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. Следовательно, дальнейшее исследование перенапряжений при коммутации асинхронных электродвигателей в условиях шахт и рудников производить нецелесообразно, так как данный вопрос широко изучен на примере асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых в общепромышленных сетях 6 кВ [13,15,48,24,43,46,61].

## ВЫВОДЫ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. С увеличением мощности силовых трансформаторов кратность перенапряжений на зажимах обмотки ВН и обмотки НН снижается как в симметричном, так и в неполнофазном режимах работы сети.

2. Кратность перенапряжений в обмотки НН существенно превышает кратности перенапряжений в обмотки ВН и не зависит от коэффициента трансформации.

3. Основная часть энергии волны коммутационных перенапряжений, возникающая в обмотки ВН передаться через ёмкостную связь в обмотку НН трансформатора.

4. В неполнофазном режиме работы сети, который возникает при обрыве одной из фаз, отключение силовых трансформаторов сопровождается перенапряжениями, величина которых по сравнению с нормальным режимом работы сети выше на 15-18%.

5. Перенапряжения, сопровождающие отключение высоковольтных электродвигателей в сетях 6кВ шахт и рудников по величине и характеру аналогичны перенапряжениям возникающие в обмотках высоковольтных электродвигателей, эксплуатируемых в общепромышленных сетях, поэтому исследование перенапряжений в данном направлении является нецелесообразным, так как данный вопрос широко изучен.

### **3 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ «ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ - КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ – ТРАНСФОРМАТОР».**

*Выполнена идентификация компьютерной модели 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.*

#### **3.1 Общие сведения и методика исследования**

При коммутации силового высоковольтного электрооборудования, передвижных и стационарных электроприемников шахт и рудников вакуумными коммутационными аппаратами возникают переходные процессы, обусловленные мгновенными изменениями параметров отключаемого участка распределительной сети. Как показали экспериментальные исследования, эти процессы протекают за очень короткий промежуток времени и сопровождаются КП, существенно превышающими номинальное напряжение сети.

Переходные процессы возникают в результате включения или отключения индуктивной и емкостной нагрузок и представляют достаточно сложную совокупность взаимосвязанных факторов, учесть которые при анализе КП не всегда представляется возможным из-за случайного характера их появления [81,78,65].

На величину КП оказывает влияние множество факторов, степень воздействия которых различна. К основным факторам можно отнести следующие: величина среза тока, тип и мощность нагрузки, тип коммутационного аппарата, длина и сечение кабельной линии. Кроме этих основных факторов на величину и характер КП оказывают влияние неодновременность замыкания и размыкания полюсов контактной системы выключателя, повторные зажигания дуги, отключающая способность выключателя по высокочастот-

ному току, наличие высших гармоник и однофазных замыканий на землю [3,72,86].

Анализ литературных источников показал, что процессы, связанные со срезом тока, определяются только теплофизическими параметрами контактного материала и процессами на катоде и прикатодной области. Они не зависят от параметров сети (источника напряжения и нагрузки). Величина среза тока зависит от состояния вакуумной дугогасительной камеры, контактной поверхности катода, материала контакта, емкости, шунтирующей контакты выключателя, величины отключаемого тока и др. Срез тока в современных вакуумных выключателях может колебаться от 1,0 до 25 А [41].

Исследования, выполненные в предыдущей главе, показали, что с ростом мощности силовых трансформаторов кратность КП снижается, как в симметричном, так и в неполнофазном режиме работы сети. При этом основная часть энергии, запасенная в обмотке ВН трансформатора, через ёмкостную связь передается в обмотку НН. Кратности перенапряжений в обмотке НН значительно превышают кратности, возникающие в обмотке ВН.

В неполнофазном режиме работы сети кратность перенапряжений, по отношению к симметричному, возрастает на 15-18%. Отметим, что данные результаты были получены экспериментальным путем. Объем экспериментальных исследований был ограничен производственными условиями, поэтому более детальное изучение данного эксперимента можно продолжить на основе моделирования КП с использованием современных компьютерных программ.

Основным моментом компьютерного моделирования является адекватность схемы моделирования системы “источник питания – вакуумный выключатель – кабельная линия – трансформатор” высокочастотному импульсному процессу.

Для анализа высокочастотных переходных процессов (ПП), возникающих в обмотках трансформатора, наиболее приемлемой схемой моделирования является схема с распределенными параметрами с учетом зависимости

параметров обмотки от частоты ПП. Однако, наличие большого числа факторов, влияющих на протекание переходного процесса при коммутации, делает практически невозможным его математическое описание. Математическое описание механизмов возникновения КП на основе трехфазной схемы с распределенными параметрами представляет чрезвычайно трудную задачу. Поэтому является целесообразным применение современных компьютерных программ, позволяющих моделировать переходные процессы при отключении трансформаторов на основе трехфазной системы с сосредоточенными параметрами.

Современные программы компьютерного моделирования позволяют значительно упростить аналитические исследования и появляется возможность широкой вариации заданных параметров схемы.

При выборе компьютерной программы моделирования переходных процессов при отключении силовых трансформаторов необходимо учитывать результаты, полученные экспериментальным путем:

- основная часть энергии волны КП, возникающих в обмотках ВН передаются в обмотки НН за счет ёмкостных связей, существующих между данными обмотками;

- в диапазоне частот  $5 \div 25$  кГц индуктивность обмотки остается практически постоянной.

Одним из наиболее мощных инструментов компьютерного моделирования является программа *MatLab*, однако использование данного пакета невозможно, так как модель выключателя в программе допускает коммутацию лишь при нулевом значении тока. Исходя из этого, компьютерное моделирование осуществлялось в программе *Multisim* [112], которая позволяет моделировать величину среза тока.

### 3.2 Обоснование схемы моделирования при отключении силовых трансформаторов

Для анализа КП, возникающих при отключении силовых трансформаторов в неполнофазном режиме, схема моделирования должна быть трехфазной, это позволит смоделировать обрыв любой фазы сети.

При отключении силового трансформатора вакуумным выключателем за счет среза тока электромагнитная энергия запасается не только в первичной обмотке, но и в магнитопроводе трансформатора, так как срез тока вызывает магнитный поток. Следовательно, параметры магнитной системы трансформатора в схеме моделирования должны присутствовать как в первичной, так и во вторичной обмотках. Переход энергии из обмотки ВН в обмотку НН, в режиме коммутации трансформатора, осуществляется за счет емкостной проводимости между данными обмотками. Основные параметры обмоток и магнитной системы трансформатора определяются по известным методикам [31,11]. Емкость обмоток по отношению к земле и емкость между обмотками ВН и обмотками НН определялись экспериментальным путем для трансформаторов мощностью 250, 400, 630 и 1000 кВ·А. Экспериментальные исследования показали, что с увеличением мощности трансформаторов изменяется емкость обмоток ВН и НН по отношению к земле. В таблице 3.1 приведены значения емкостей обмотки ВН и НН по отношению к земле для вышеуказанных трансформаторов.

Таблица 3.1 Емкостные связи трансформаторов.

$S_T$ , кВ·А	Емкость обмотки ВН по отношению к земле, нФ	Емкость 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

При моделировании величина среза тока определялась углом коммутации от  $9^\circ$  до  $90^\circ$ . Угол коммутации задавался с использованием шунта, последовательно включенного с обмотками трансформатора, сопротивление которого в 30 и более раз меньше активного сопротивления обмотки ВН. При моделировании разрыв контактов вакуумного выключателя принимался одновременным, отскок контактов не учитывался.

### 3.3 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 250 кВ·А

Схема моделирования представлена на рисунке 3.1, где  $L_1, L_5, L_9$  и  $R_1, R_5, R_9$  – индуктивное и активное сопротивление обмотки ВН трансформатора;  $L_4, L_8, L_{12}$  и  $R_1, R_5, R_9$  – индуктивное и активное сопротивление обмотки НН трансформатора;  $L_{10}, L_{11}, L_2, L_3, L_6, L_7$  и  $R_{10}, R_{11}, R_2, R_3, R_6, R_7$  – индуктивное и активное сопротивление цепи намагничивания трансформатора;  $C_1, C_4, C_7$  – емкость между обмотками ВН и НН;  $C_2, C_5, C_8$  – емкость обмотки ВН по отношению к земле;  $C_3, C_6, C_9$  – емкость обмотки НН по отношению к земле;  $R_{14}, R_{15}, R_{16}$  – сопротивление изоляции обмотки НН по отношению к земле;  $R_{15}, R_{16}$  – шунты.

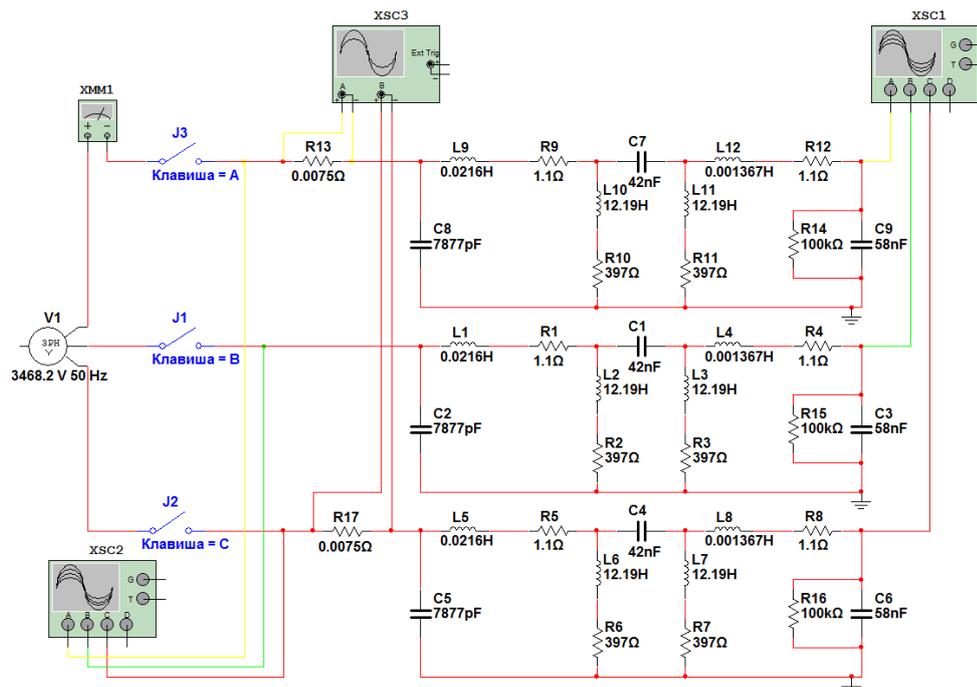


Рисунок 3.1 - Схема моделирования трансформатора мощностью 250 кВ·А.

Моделирование КП осуществлялось при углах коммутации от  $9^\circ$  до  $90^\circ$ . Результаты полученных максимальных кратностей перенапряжений, как в обмотке ВН, так и в обмотке НН, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумным выключателем трансформатора мощностью 250 кВ·А в симметричном режиме.

$\varphi$	$9^\circ$	$18^\circ$	$27^\circ$	$36^\circ$	$45^\circ$	$54^\circ$	$63^\circ$	$72^\circ$	$81^\circ$	$90^\circ$
$i, mA$	132	260,5	382,7	495,4	596	681,9	751	801,6	832,5	842,9
$U_{maxBH}, B$	21260	22057	22577	22577	22057	20809	19387	21780	22577	23063
$K_{maxBH}$	6,13	6,36	6,51	6,51	6,36	6,0	5,59	6,28	6,51	6,51
$K_{maxHH}$	62,9	65,2	65,2	65,2	61,7	58,3	60,6	64,1	65,2	65,2

Анализируя данные таблицы 3.1 видно, что максимальные перенапряжения в симметричном режиме, полученные в процессе моделирования, практически совпадают с экспериментальными данными и возникают при следующих углах коммутации -  $27^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $81^\circ$  и  $90^\circ$ . Можно предположить, что в реальных условиях, при использовании вакуумного выключателя, углы коммутации могут составлять  $27^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $81^\circ$  и  $90^\circ$  или близкие к ним.

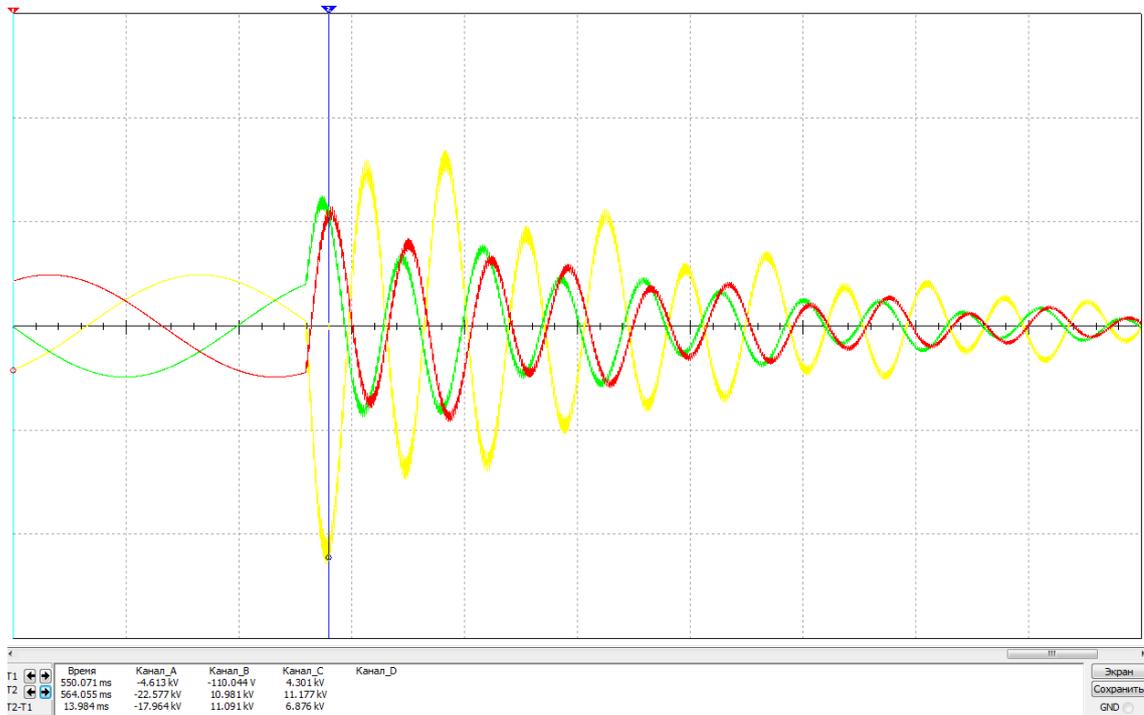
При обрыве одной из фаз сети (неполнофазный режим), для оценки максимально возможных кратностей перенапряжений зададим выбранные углы коммутации. Результаты полученных кратностей представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумного выключателя, обрыв фазы.

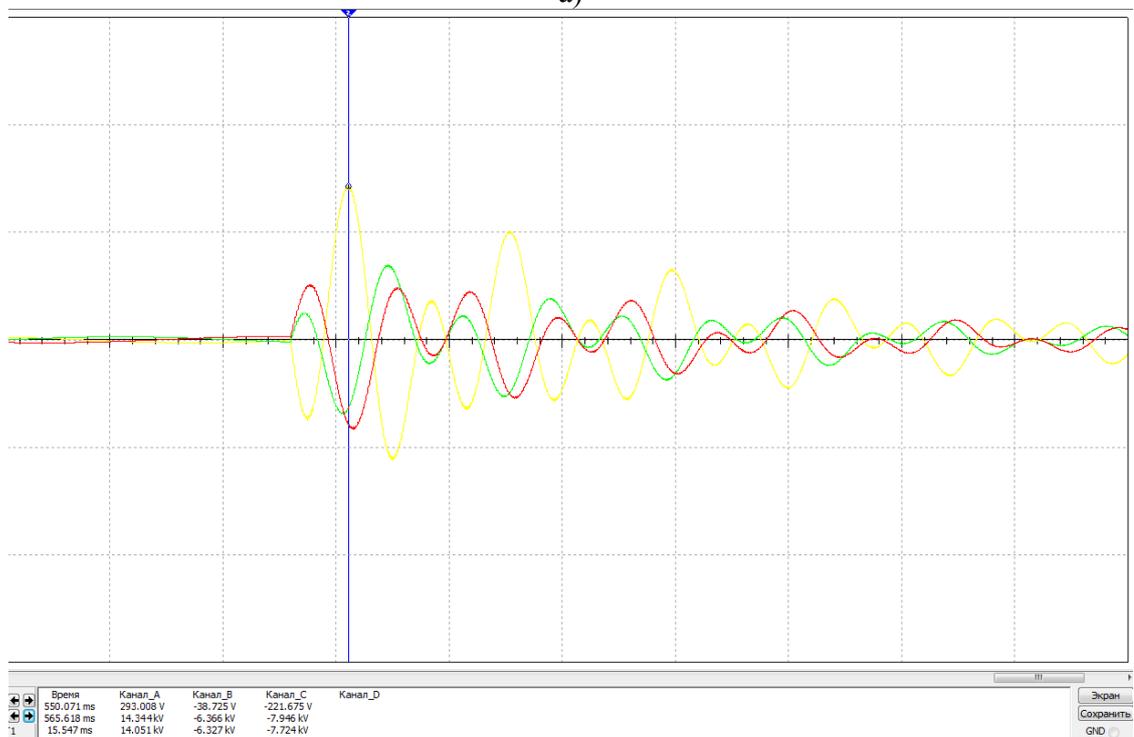
$\varphi$	$9^\circ$	$18^\circ$	$27^\circ$	$36^\circ$	$45^\circ$	$54^\circ$	$63^\circ$	$72^\circ$	$81^\circ$	$90^\circ$
$i, mA$	132	260,5	382,7	495,4	596	681,9	751	801,6	832,5	842,9
$U_{maxBH}, B$	6416	9745	13317	17687	19734	22300	23583	23861	25629	27190
$K_{maxBH}$	1,85	2,81	3,84	5,1	5,69	6,43	6,8	6,88	7,39	7,67
$K_{maxHH}$	22,1	32,6	42,0	51,3	57,1	61,7	64,1	65,2	67,6	71,1

В результате моделирования максимальная кратность перенапряжений в неполнофазном режиме на зажимах обмотки ВН, при угле коммутации  $90^\circ$ ,

составила 7,81, что на 18% выше максимальной кратности перенапряжений полученной в симметричном режиме. Характерные осциллограммы при моделировании КП в симметричном и неполнофазном режимах представлены на рисунках 3.2 и 3.3 соответственно для обмотки ВН и для обмотки НН.

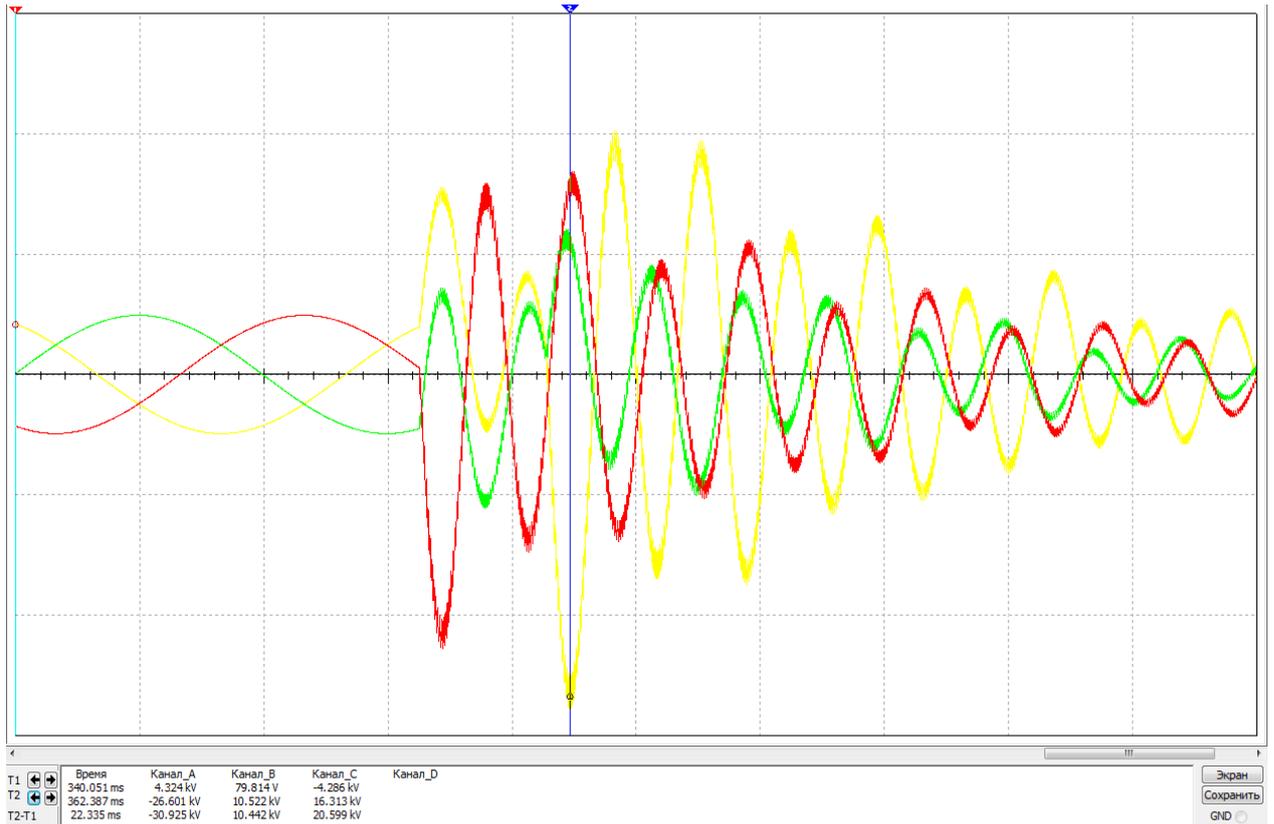


а)

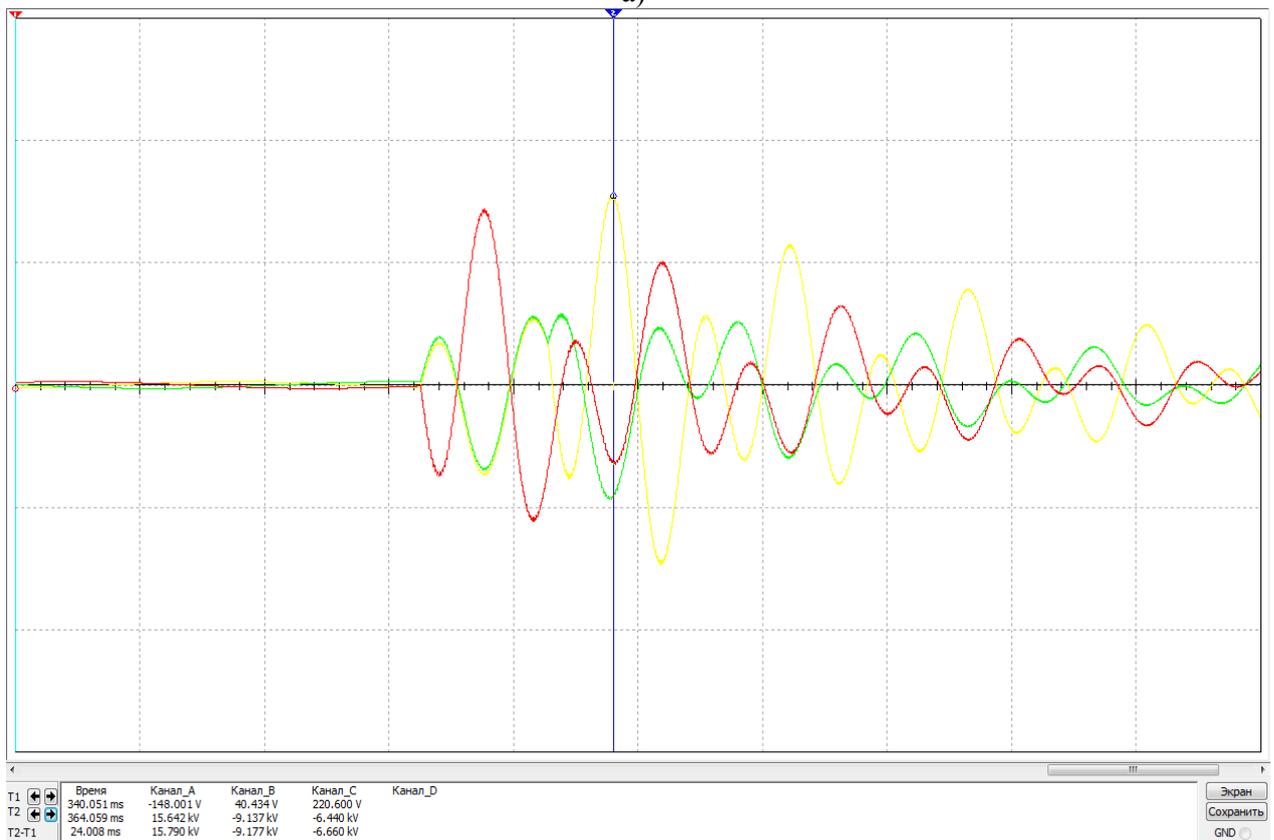


б)

Рисунок 3.2 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 250 кВ·А в симметричном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН



а)



б)

Рисунок 3.3 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 250 кВ·А в неполнофазном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН

### 3.4 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 400 кВ·А

Схема моделирования представлена на рисунке 3.4. Назначение элементов в схеме на рисунке 3.4 аналогичны элементам схемы представленной на рисунке 3.1.

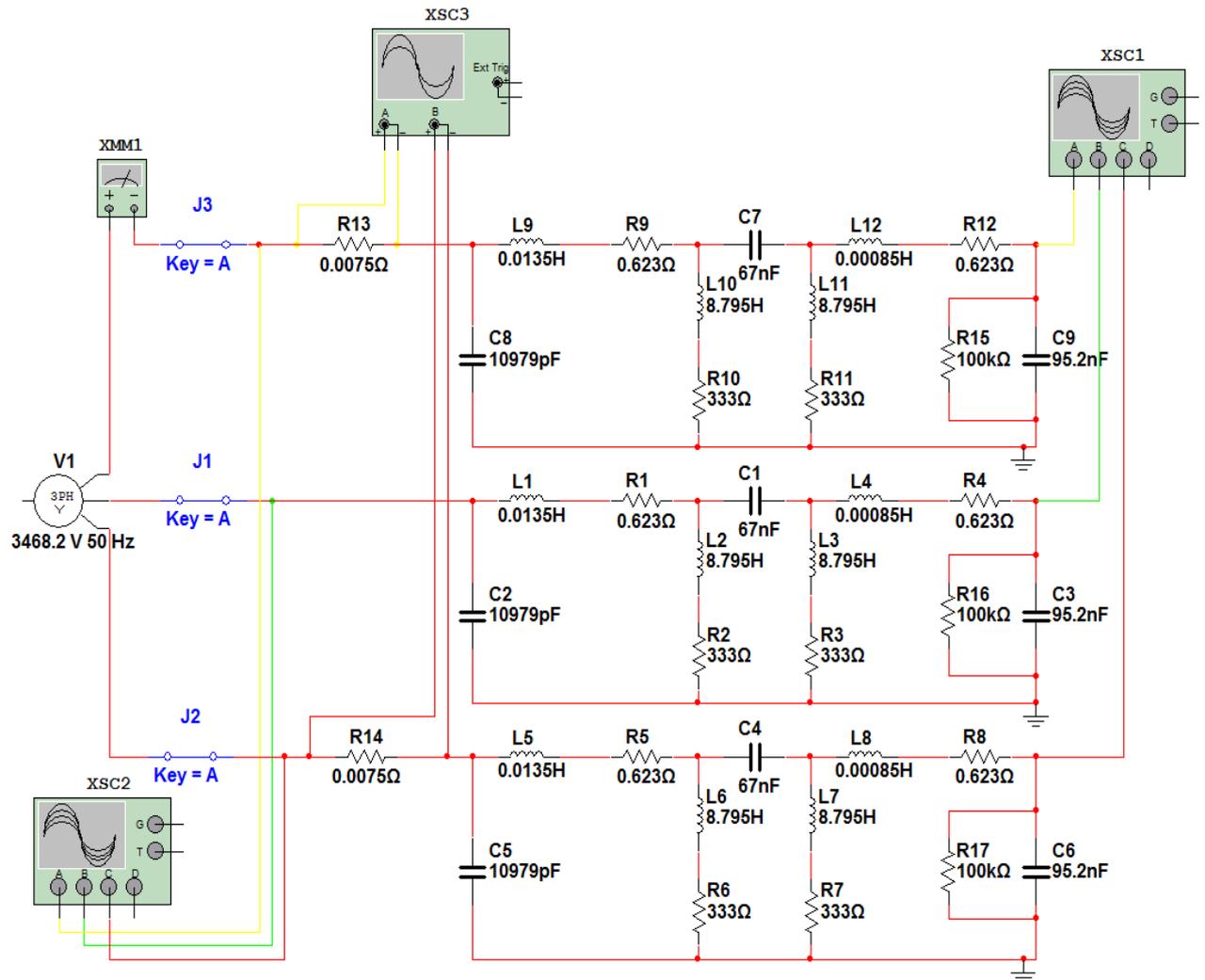


Рисунок 3.4 - Схема моделирования трансформатора мощностью 400 кВ·А.

Моделирование КП осуществлялось при угле коммутации от  $9^\circ$  до  $90^\circ$ . Результаты полученных максимальных кратностей перенапряжений, как в обмотке ВН, так и в обмотке НН, представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумным выключателем трансформатора мощностью 400 кВ·А в симметричном режиме.

$\varphi$	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
$i, mA$	180,9	357,3	524,9	679,5	817,5	935,3	1030	1099,5	1141,9	1156,1
$U_{maxBH}, B$	20012	20775	21260	21538	20775	20012	18728	20254	21260	21260
$K_{maxBH}$	5,77	5,99	6,13	6,21	5,99	5,77	5,4	5,84	6,13	6,13
$K_{maxHH}$	59,4	60,6	61,7	60,6	58,3	55,9	57,1	59,4	60,6	60,6

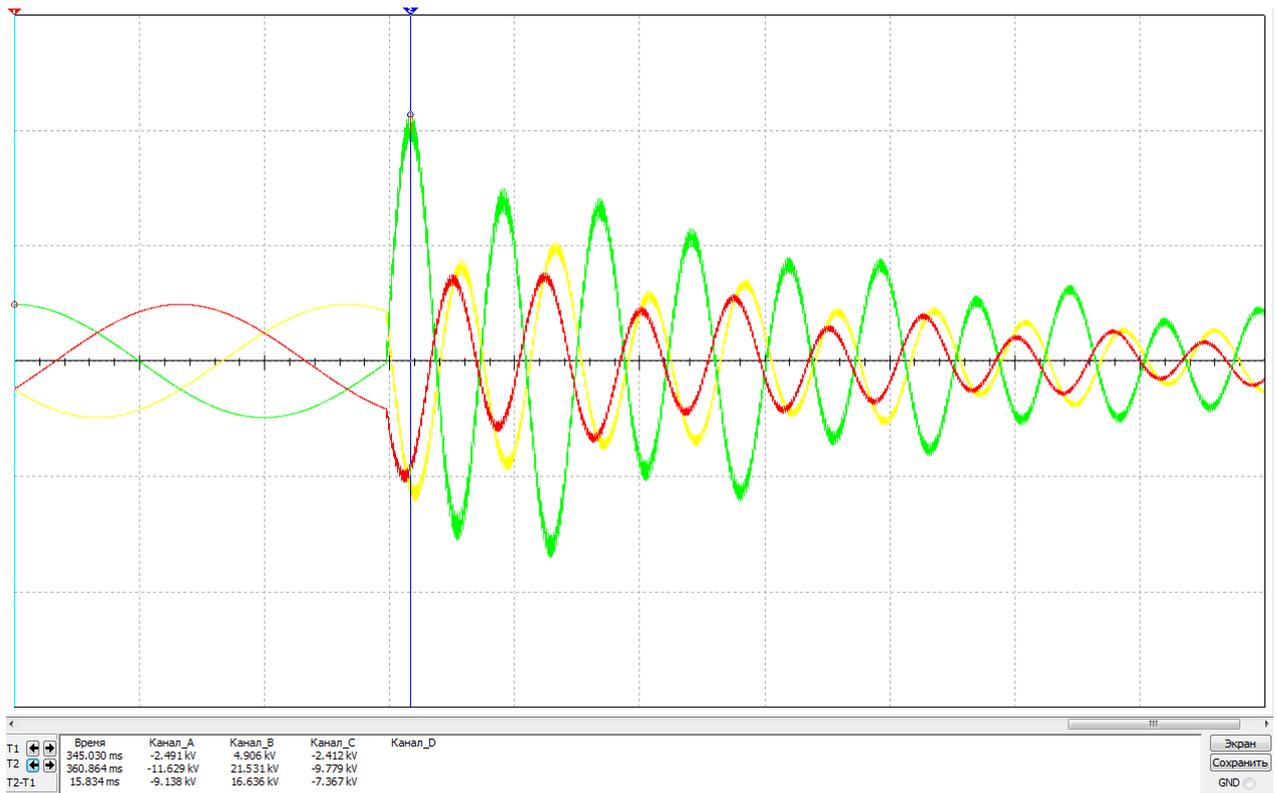
Из таблицы 3.4 видно, что максимальные кратности перенапряжений в симметричном режиме возникают при следующих углах коммутации - 27°, 36°, 81° и 90°. Это указывает на то, что в реальных условиях, при использовании вакуумного выключателя, углы коммутации составляли - 27°, 36°, 81° и 90° или близкие к ним.

При обрыве одной из фаз сети (неполнофазный режим), для оценки максимально возможных кратностей перенапряжений зададим выбранные углы коммутации. Результаты моделирования представлены в таблице 3.4.2.

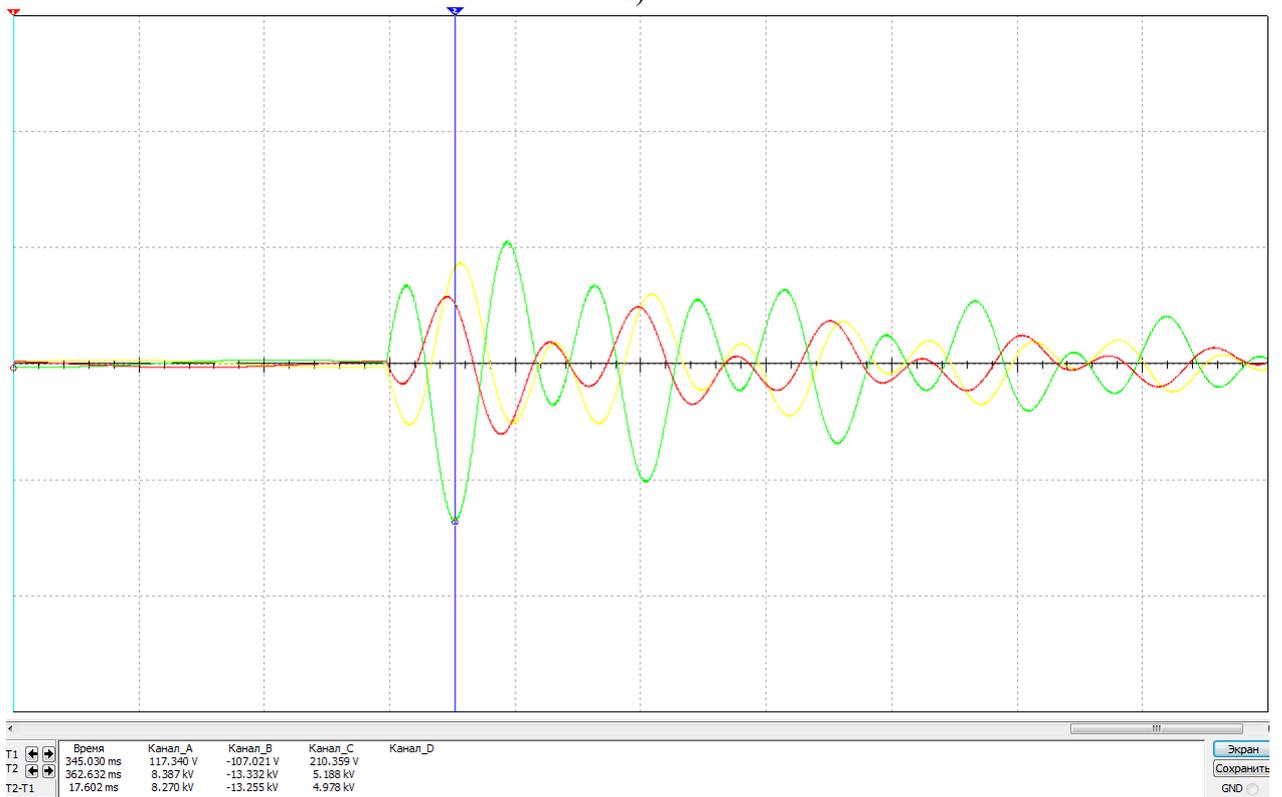
Таблица 3.5 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумного выключателя, обрыв фазы.

$\varphi$	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
$i, mA$	180,9	357,3	524,9	679,5	817,5	935,3	1030	1099,5	1141,9	1156,1
$U_{maxBH}, B$	6416	7942	10266	15642	16647	19214	21850	23445	24347	25110
$K_{maxBH}$	1,85	2,29	2,96	4,51	4,8	5,54	6,3	6,76	7,02	7,24
$K_{maxHH}$	23,3	29,1	33,8	46,6	49,0	58,3	61,8	64,1	64,5	65,2

Анализ данных, полученных в результате моделирования, показывает, что максимальная кратность перенапряжений в неполнофазном режиме на зажимах обмотки ВН, при угле коммутации 90°, составила 7,24, что на 17% выше максимальной кратности перенапряжений полученной в симметричном режиме. Характерные осциллограммы при моделировании КП в симметричном и неполнофазном режиме представлены на рисунках 3.5 и 3.6 соответственно для обмотки ВН и для обмотки НН.

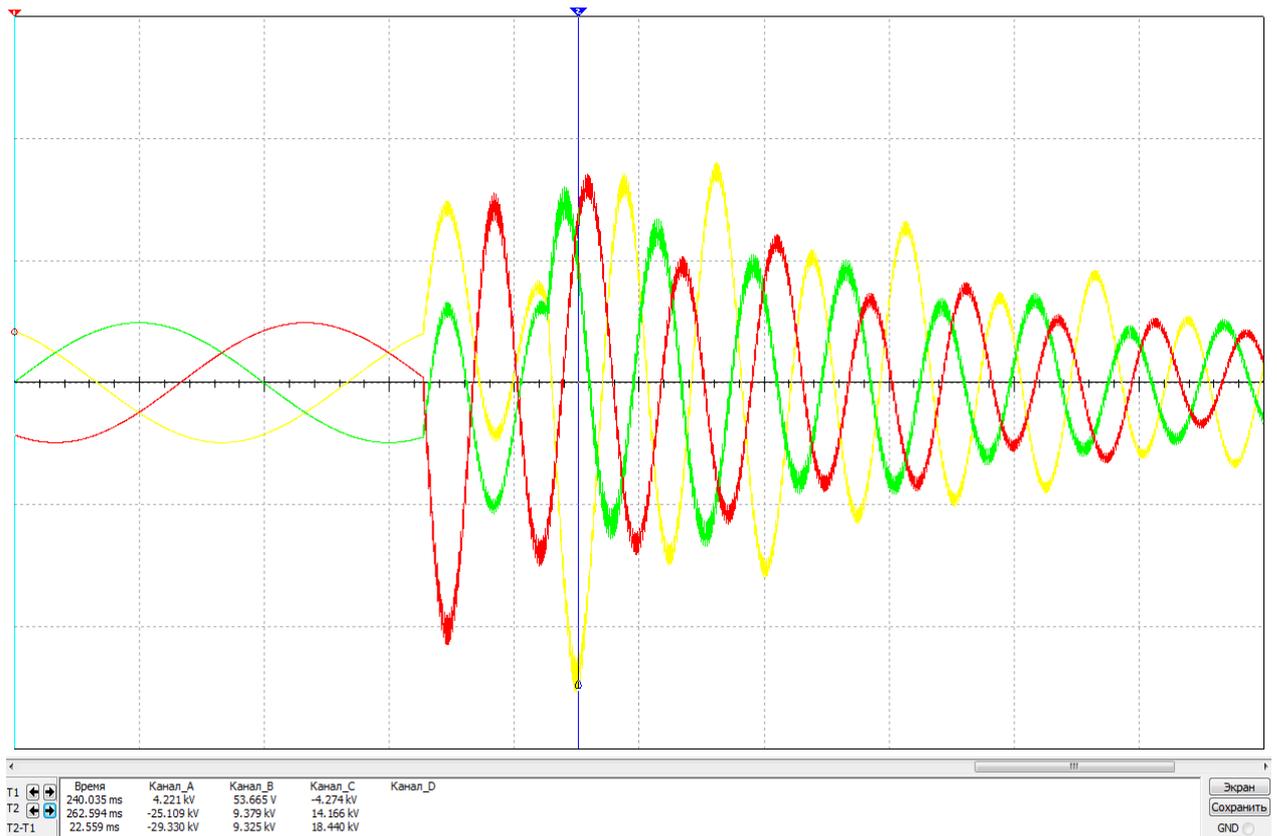


а)

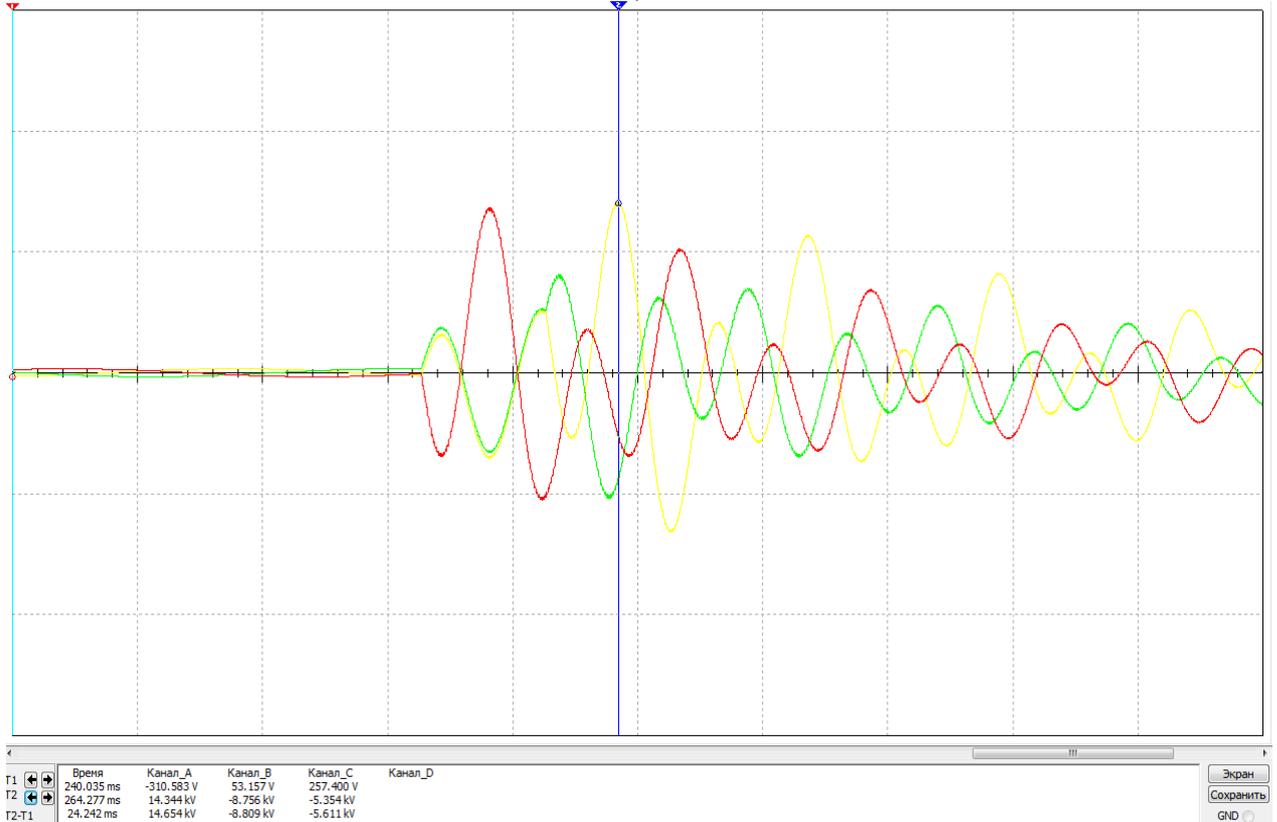


б)

Рисунок 3.5 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 400 кВ·А в симметричном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН



а)



б)

Рисунок 3.6 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 400 кВ·А в неполнофазном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН

### 3.5 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 630 кВ·А

Схема моделирования представлена на рисунке 3.7. Назначение элементов в схеме на рисунке 3.7 аналогичны элементам схемы представленной на рисунке 3.1.

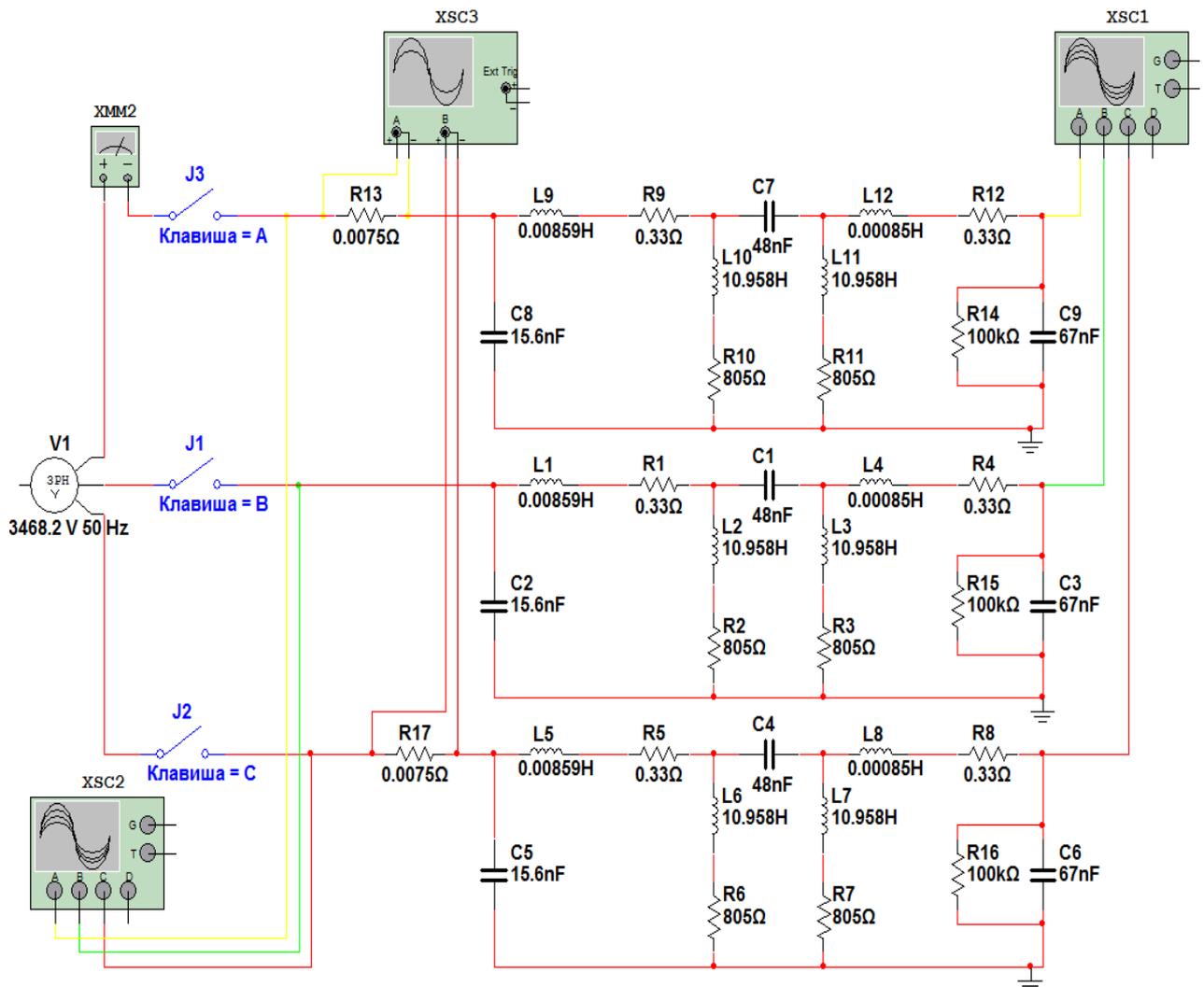


Рисунок 3.7 - Схема моделирования трансформатора мощностью 630 кВ·А.

Моделирование КП осуществлялось при угле коммутации от  $9^\circ$  до  $90^\circ$ . Результаты полученных максимальных кратностей перенапряжений, как в обмотке ВН, так и в обмотке НН, представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумного выключателя, симметричный режим.

$\varphi$	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
$i, mA$	142,4	281,3	413,3	535,1	643,8	736,5	811,2	865,8	899,2	910,4
$U_{maxBH}, B$	17341	18312	19075	18832	18624	17688	16682	18000	18694	19110
$K_{maxBH}$	5,0	5,28	5,5	5,43	5,37	5,1	4,81	5,19	5,39	5,51
$K_{maxHH}$	54,1	56,1	56,6	55,9	53,5	50,8	51,9	54,7	56,4	56,6

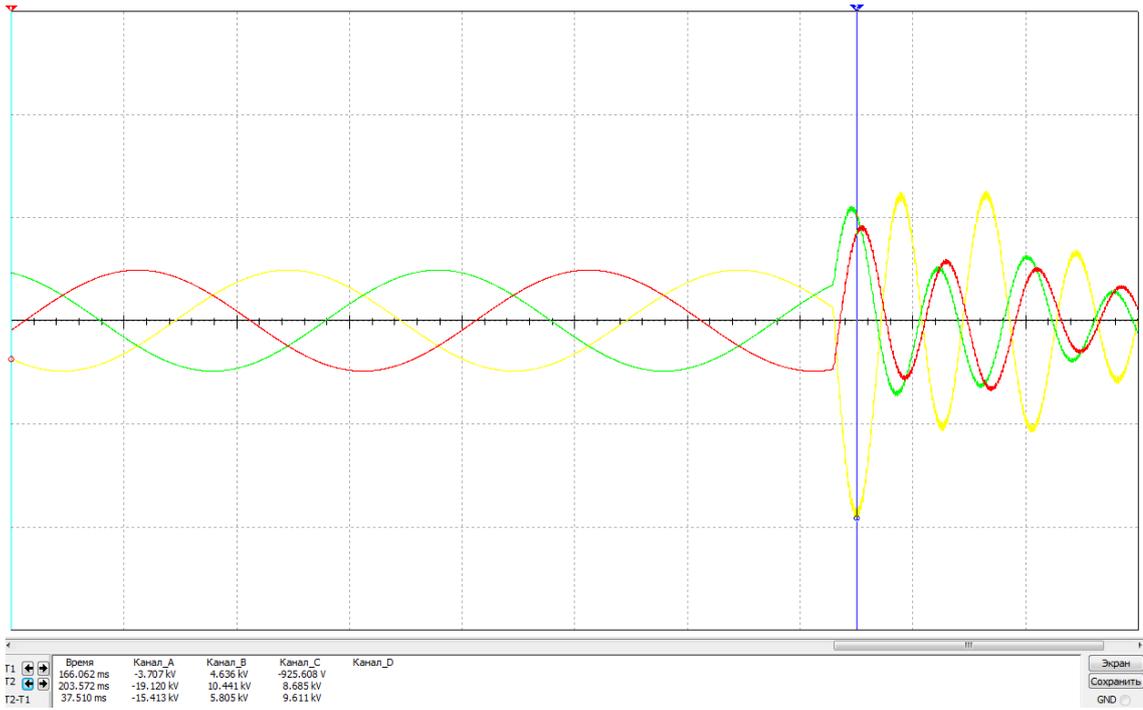
Из анализа таблицы 3.6 видно, что максимальные кратности перенапряжений в симметричном режиме возникают при следующих углах коммутации - 27°, 36°, 81° и 90°. Таким образом можно утверждать, что в реальных условиях, при использовании вакуумного выключателя, углы коммутации составляли 27°, 36°, 81° и 90° или близкие к ним.

При обрыве одной из фаз сети, неполнофазный режим, для оценки максимально возможных кратностей перенапряжений зададим выбранные углы коммутации. Результаты моделирования представлены в таблице 3.7.

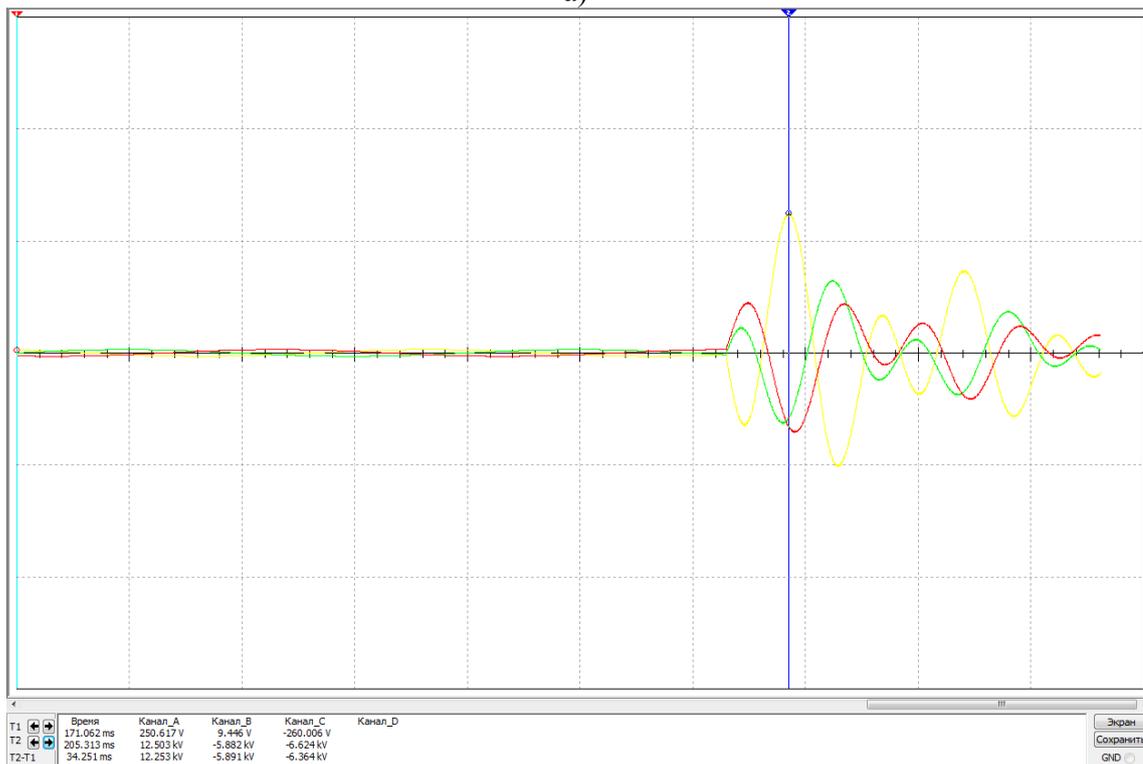
Таблица 3.7 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумного выключателя, обрыв фазы.

$\varphi$	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
$i, mA$	142,4	281,3	413,3	535,1	643,8	736,5	811,2	865,8	899,2	910,4
$U_{maxBH}, B$	3468	6139	10058	11792	14220	16543	17029	17723	19630	20081
$K_{maxBH}$	1,0	1,77	2,9	3,4	4,1	4,77	4,91	5,11	5,66	5,79
$K_{maxHH}$	18,5	24,8	30,4	39,7	46,5	48,6	53,2	54,6	56,2	56,8

Данные, полученные в результате моделирования, указывают на то, что максимальная кратность перенапряжений в неполнофазном режиме на зажимах обмотки ВН, при угле коммутации 90°, составила 5,79, что на 5,1% выше максимальной кратности перенапряжений полученной при симметричном режиме. Характерные осциллограммы при моделировании КП в симметричном и неполнофазном режиме представлены на рисунках 3.8 и 3.9 соответственно для обмотки ВН и для обмотки НН.

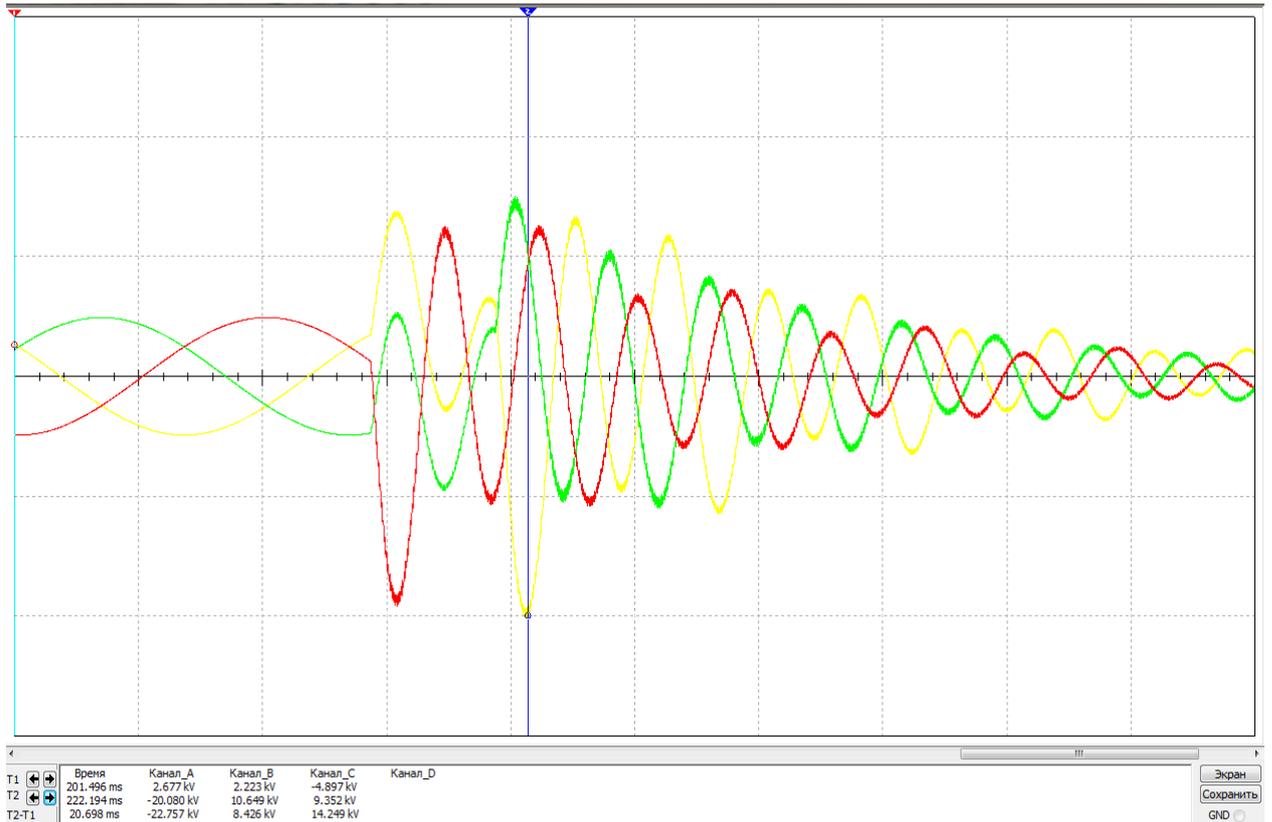


а)

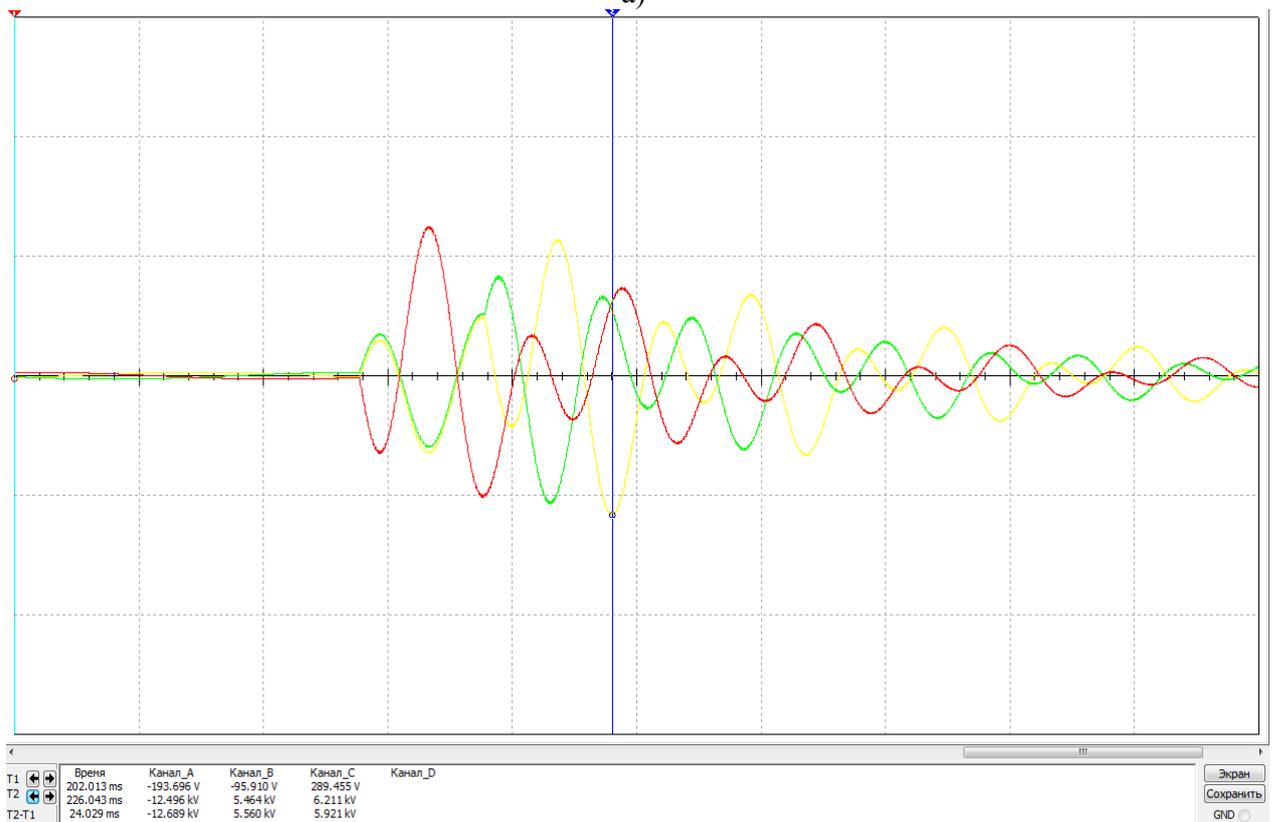


б)

Рисунок 3.8 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 630 кВ·А в симметричном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН



а)



б)

Рисунок 3.9 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 630 кВ·А в неполнофазном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН

### 3.6 Моделирование перенапряжений при коммутации сухого трансформатора мощностью 1000 кВ·А

Схема моделирования представлена на рисунке 3.10. Назначение элементов в схеме на рисунке 3.10 аналогичны элементам схемы представленной на рисунке 3.1.

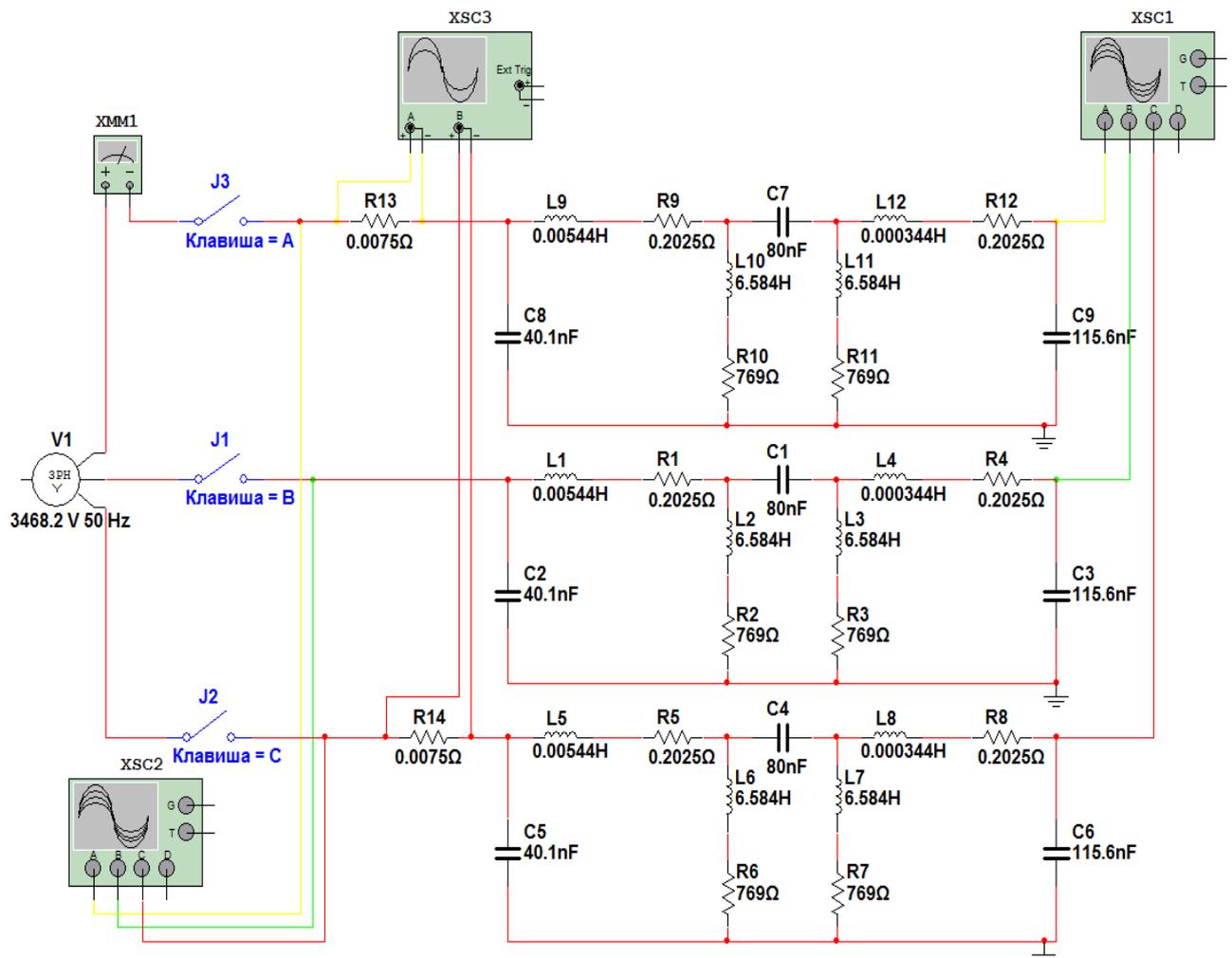


Рисунок 3.10 - Схема моделирования трансформатора мощностью 1000 кВ·А.

Моделирование КП осуществлялось при угле коммутации от  $9^\circ$  до  $90^\circ$ . Результаты полученных максимальных кратностей перенапряжений, как в обмотке ВН, так и в обмотке НН, представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумного выключателя, симметричный режим.

$\varphi$	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
$i, mA$	226	446	656	849,3	1090,6	1169	1287,5	1374	1427	1445
$U_{maxBH}, B$	14913	15746	16058	16058	15572	15225	14324	14983	15884	16335
$K_{maxBH}$	4,3	4,54	4,63	4,63	4,49	4,39	4,13	4,32	4,58	4,71
$K_{maxHH}$	49,1	51,6	51,6	51,1	50,3	47,5	47,3	50,0	51,8	52,0

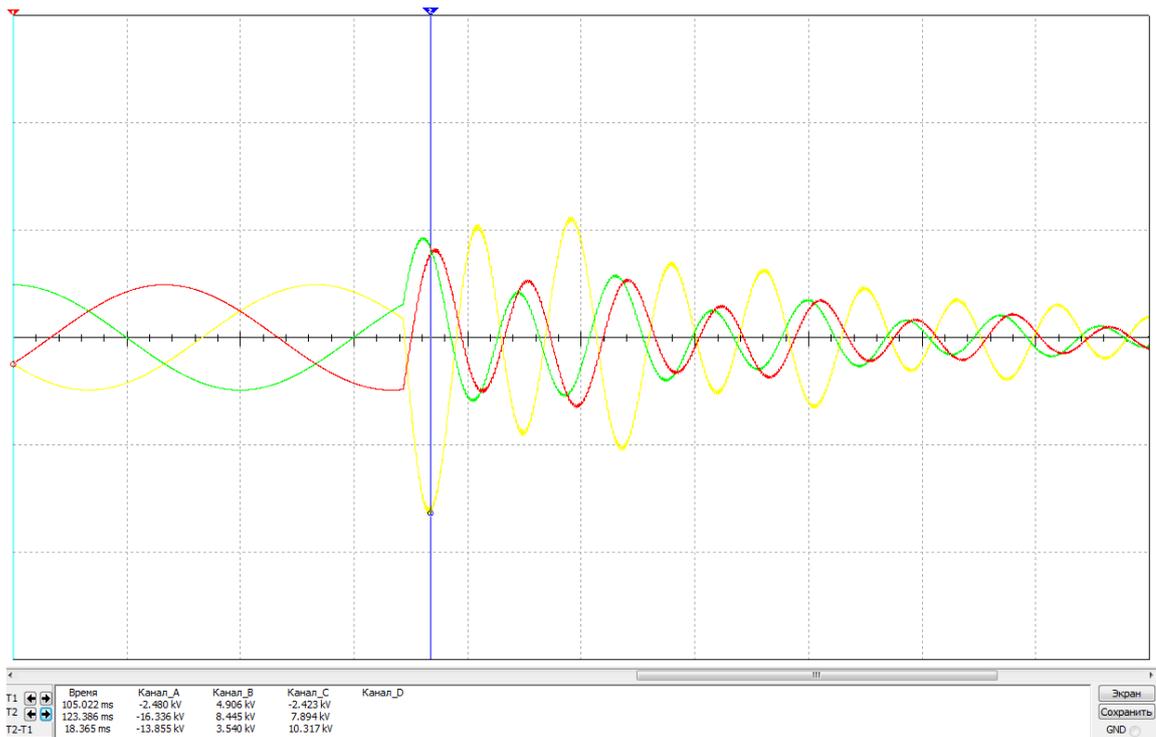
Анализ таблицы 3.6.1 показывает, что максимальные кратности перенапряжений, в симметричном режиме, возникают при следующих углах коммутации - 27°, 36°, 81° и 90°. Можно предположить, что в реальных условиях, при использовании вакуумного выключателя, углы коммутации составляли 27°, 36°, 81° и 90° или близкие к ним.

При обрыве одной из фаз сети, неполнофазный режим, для оценки максимально возможных кратностей перенапряжений зададим выбранные углы коммутации, результаты представлены в таблице 3.9.

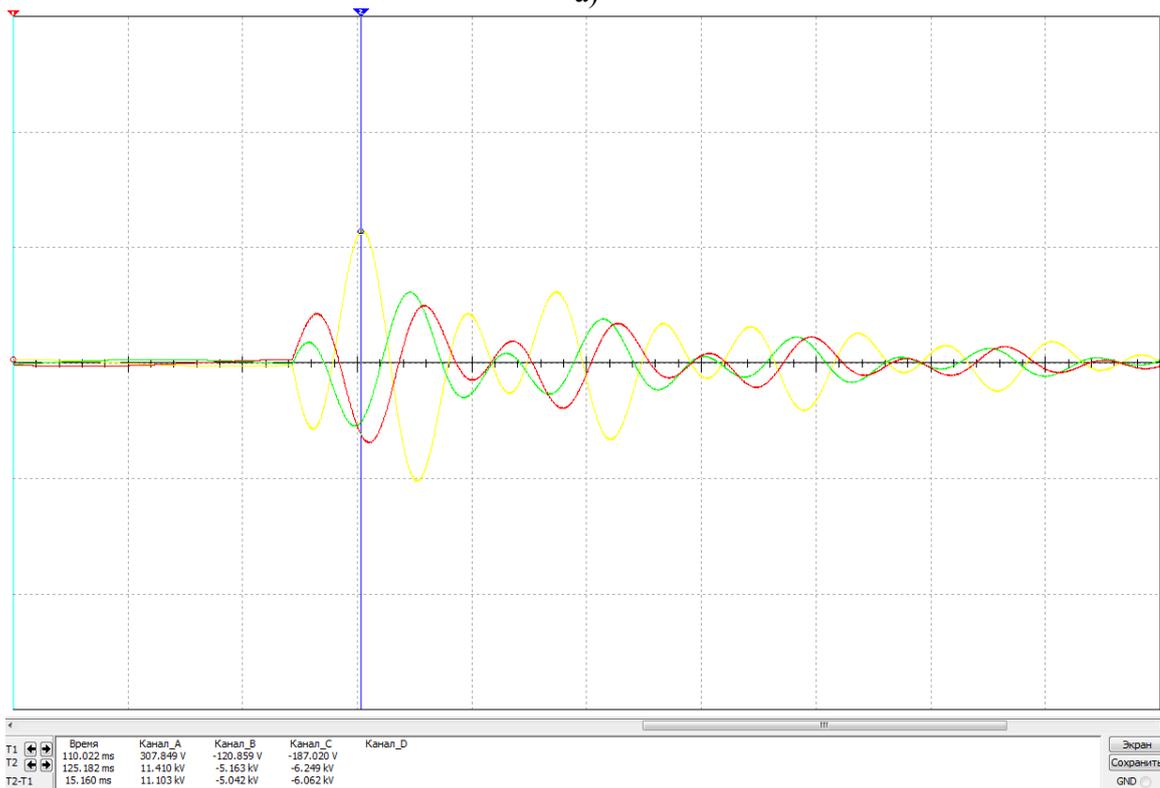
Таблица 3.9 Максимальные кратности перенапряжений при различных углах коммутации вакуумного выключателя, обрыв фазы.

$\varphi$	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
$i, mA$	226	446	656	849,3	1090,6	1169	1287,5	1374	1427	1445
$U_{maxBH}, B$	3468	5272	8254	10543	11618	12867	14220	15087	16543	18035
$K_{maxBH}$	1,0	1,52	2,38	3,04	3,35	3,71	4,1	4,35	4,77	5,2
$K_{maxHH}$	17,6	23,1	32,0	36,6	38,8	44,6	48,4	50,7	53,7	55,1

Анализ данных, полученных в результате моделирования, показывает, что максимальная кратность перенапряжений в неполнофазном режиме на зажимах обмотки ВН, при угле коммутации 90°, составляет 5,2, что на 10,4% выше максимальной кратности перенапряжений полученной при симметричном режиме. Характерные осциллограммы при моделировании КП в симметричном и неполнофазном режиме представлены на рисунках 3.11 и 3.12 соответственно для обмотки ВН и для обмотки НН.

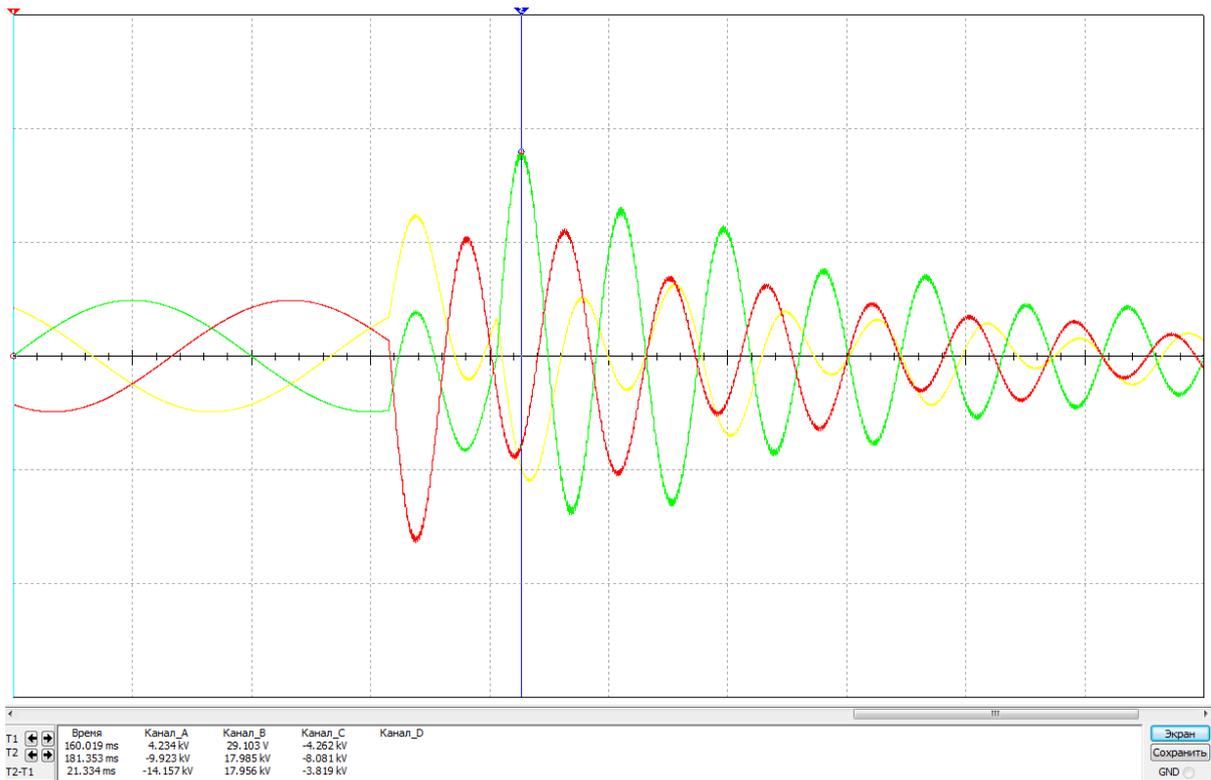


а)

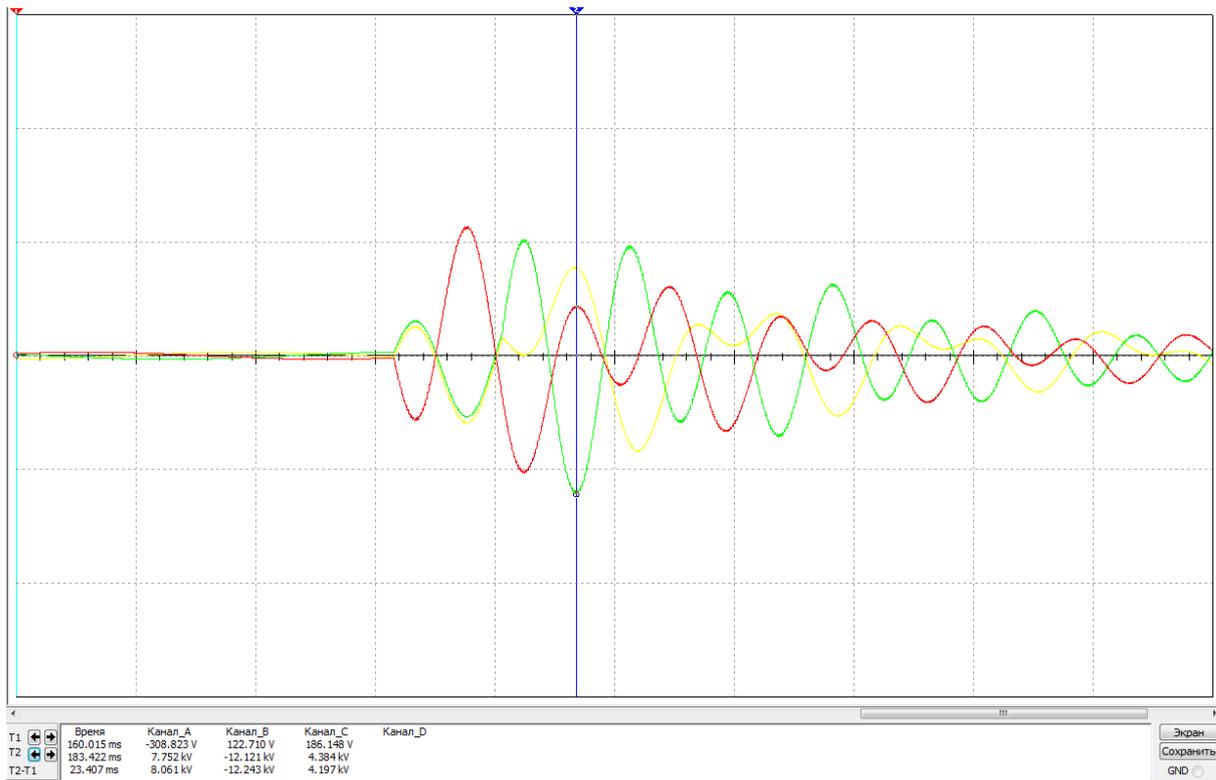


б)

Рисунок 3.11 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 1000 кВ·А в симметричном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН



а)



б)

Рисунок 3.12 - Характерные осциллограммы при отключении модели силового трансформатора мощностью 1000 кВ·А в неполнофазном режиме: а) обмотка ВН, б) обмотка НН

### 3.7 Анализ полученных результатов.

Анализ полученных результатов моделирования перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов выполнен по двум критериям:

- изменение максимальной кратности в зависимости от мощности трансформатора и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для симметричного и неполнофазного режимов работы сети;

- изменение коэффициента  $\lambda$  в зависимости от мощности трансформатора и сравнение его с экспериментальными данными.

На рисунке 3.13 представлены зависимости  $K_{\max}$  от мощности трансформаторов, полученные на основе моделирования и экспериментальных данных.

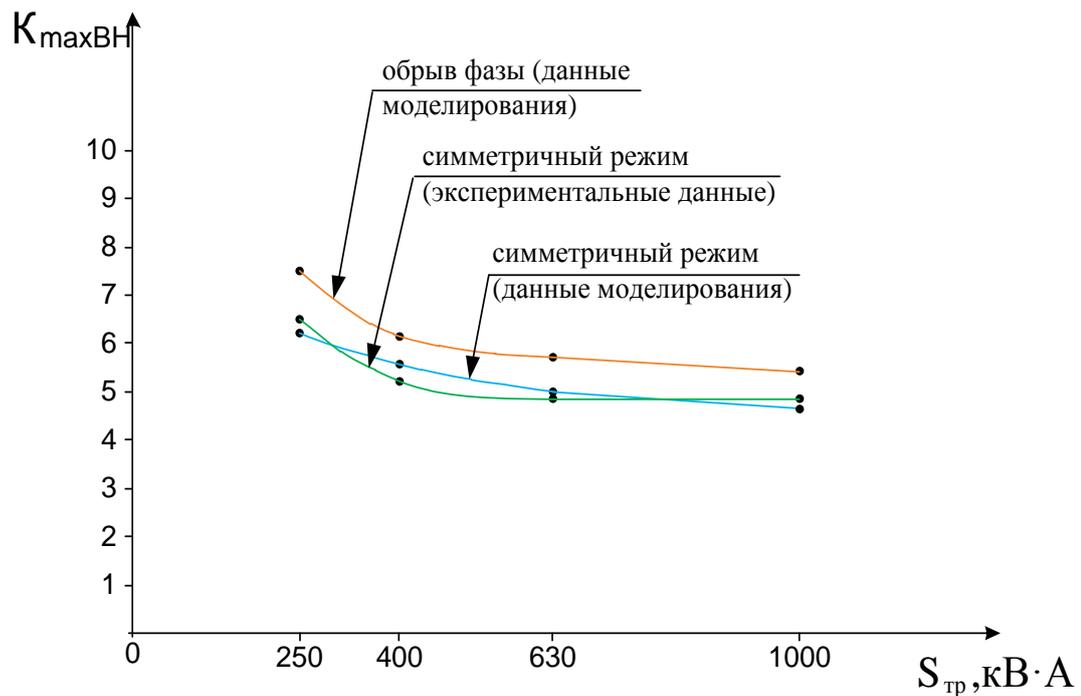


Рисунок 3.13 - Зависимость  $K_{\max}$  от мощности трансформаторов полученных на основе моделирования и экспериментальных данных

Анализ данных зависимостей показывает, что при 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, зависимость максимальных кратностей пе-

ренапряжений от мощности силовых трансформаторов в неполнофазном режиме работы сети, полученные на основе моделирования, можно считать близким и к реальным значениям.

Результаты моделирования показывают, что при отключении трансформаторов в неполнофазном режиме кратность перенапряжений может возрасти на 5-18% в зависимости от мощности трансформатора. На рисунке 3.14 показана зависимость отношения кратности КП, возникающих в обмотке ВН и обмотке НН, от мощности трансформаторов. Данная зависимость имеет линейный характер и практически параллельна оси абсцисс. Это указывает на то, что изменение коэффициента  $\lambda$ , полученного при помощи моделирования, не зависит от коэффициента трансформации и мощности трансформатора. Аналогичные результаты получены при выполнении экспериментальных исследований.

Таким образом, разработанная модель трансформатора достаточно точно отображает переходные процессы, возникающие при отключении силовых трансформаторов вакуумным выключателем и в дальнейшем может служить основой для анализа эффективности обоснования рациональных методов и средств ограничения КП.

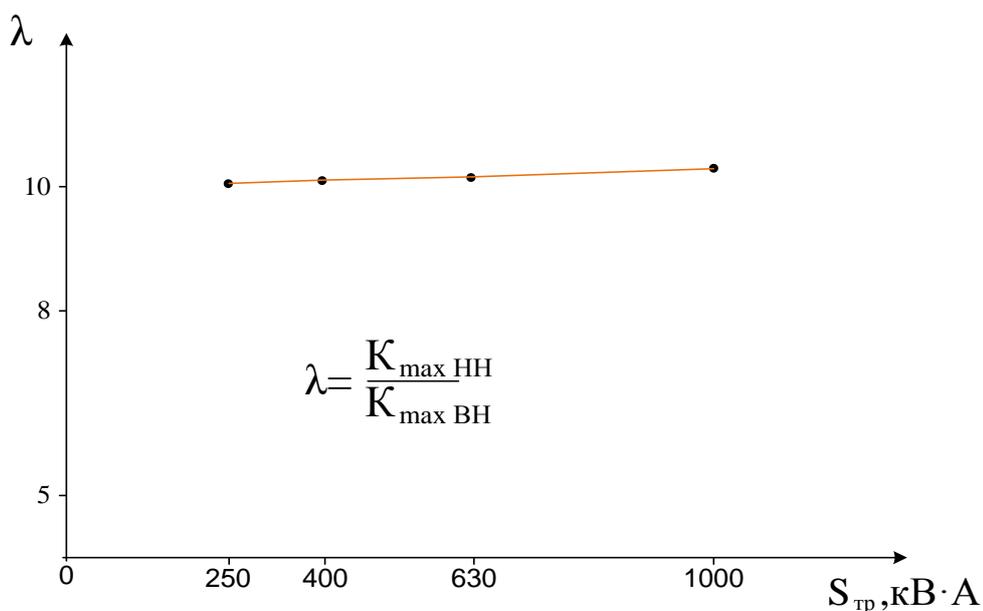


Рисунок 3.14 - Зависимость отношения кратности КП возникающей в обмотке низкого и высокого напряжения от мощности трансформатора.

## ВЫВОДЫ.

На основе вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. На основе моделирования установлено, что при отключении в симметричном режиме от сети силовых трансформаторов мощностью 250, 400, 630 и 1000 кВ·А вакуумным выключателем максимальные кратности перенапряжений, возникающие при углах коммутации -  $27^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $81^\circ$  и  $90^\circ$ , то есть линейная зависимость между углом коммутации и КП отсутствует.

2. Относительная погрешность  $K_{\max}$  при отключении силовых трансформаторов при симметричном режиме работы сети, между экспериментальными значениями и данными полученными в результате моделирования, не превышает 5%. Это позволяет утверждать, что результаты моделирования для неполнофазного режима сети будут соответствовать реальным значениям.

3. При коммутации силовых трансформаторов в случае обрыва одной из фаз сети кратность перенапряжений, по отношению к симметричному режиму, может возрасти на 5-18%.

4. Характер изменения коэффициента  $\lambda$ , полученный на основе моделирования и экспериментальным путем, практически совпадает. Это указывает на то, что принятая модель силового трансформатора достоверно отражает процесс передачи энергии из обмоток ВН в обмотки НН, которая осуществляется за счет емкостных связей между данными обмотками.

5. Разработанную модель трансформатора в режиме коммутации можно использовать для оценки существующих и разработке новых средств и способов эффективного ограничения перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов.

6. Установлено, что в случае отключения трансформатора от сети 6 кВ в неполнофазном режиме с ростом угла коммутации возрастают КП, а максимальные кратности КП зафиксированы при угле коммутации  $90^\circ$ .

## **4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КП В СЕТЯХ 6 кВ ШАХТ И РУДНИКОВ.**

*Выполнен анализ существующих методов оценки и прогнозирования КП в сетях 6-10 кВ промышленных предприятий. Обоснован и предложен метод оценки КП в сетях 6 кВ применительно к условиям шахт и рудников.*

### **4.1 Общие сведения.**

Результаты исследования, приведенные в первых трех главах показывают, что широкое использование ВВ в системах электроснабжения 6 кВ шахт и рудников приводит к снижению затрат на эксплуатацию парка выключателей. Однако, без специальных мер по ограничению КП аварийность сетей и электрооборудования имеет тенденцию к возрастанию.

Существующая конструкция современных передвижных ТП способствует возникновению наиболее высоких кратностей КП. Кратность КП при непосредственном расположении ВВ на вводе силового трансформатора может изменяться в диапазоне  $4,6 \div 6,6$  в зависимости от мощности трансформатора. В неполнофазном режиме приведенная кратность КП может возрасти на 5-18% в зависимости от угла коммутации и мощности трансформатора. Своевременное прогнозирование и оценка КП при использовании различных типов высоковольтных выключателей, ТП с разной мощностью установленных трансформаторов и с учетом параметров КЛ, а так же показателей качества электрической энергии, позволит обоснованно подойти к выбору необходимых средств защиты от КП и обоснованию рациональных точек подключения данных защит.

Существующие методы прогнозирования и оценки КП охватывают распределительные сети 6-10кВ промышленных предприятий. Относительно систем электроснабжения 6кВ шахт и рудников, вопрос, связанный с методами оценки КП практически не рассматривался. В настоящей главе приведено решение данной задачи.

## **4.2 Анализ существующих методов оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6-10 кВ.**

В настоящее время для оценки КП используются: экспериментальный метод [39,61], методы математического [44,103], физического [92] и компьютерного моделирования [112,21,90], метод оценки КП основанный на регрессивных уравнениях [65], экспресс - методы оценки КП [5] и комплексный метод прогнозирования КП [17].

### **4.2.1 Математические, физические, экспериментальные, компьютерные методы моделирования и метод оценки КП на основе регрессионных уравнений**

*Методы математического моделирования.* Применение ЭВМ и современных пакетов математических программ позволяет производить математическое моделирование трехфазных схем замещения питающей сети, выключателя, кабеля и электроприемника. Это дает возможность учесть влияние естественной несимметрии изоляции отдельных фаз, несинхронность замыкания или размыкания контактов. Однако описание процесса инициализации КП в этом случае является очень трудоемкой задачей, так как необходимо составить и решить большое количество дифференциальных уравнений в частных производных, составленных для трехфазной схемы замещения.

Много проще представляется решение задачи математического моделирования на основе однолинейной схемы замещения вследствие значительного сокращения количества дифференциальных уравнений [49].

В работах [44,49,73] выполнены теоретические исследования КП и получены аналитические выражения для расчета напряжения на нагрузке при ее коммутации. Так, в работе [44] выведены выражения для определения напряжения на нагрузке в момент неселективного отключения электродвигателя в режиме однофазного замыкания на землю вакуумными выключателями.

В работе [49] получены выражения для определения перенапряжений на нагрузке с учетом повторных зажиганий дуги в вакуумной камере выключателя.

Аналитические выражения, представленные в работах [44,49], сложно использовать в практическом применении при оценке КП для большого числа электродвигателей с различными параметрами, так как не все параметры, используемые в приведенных выше выражениях, указаны в паспортных данных электродвигателей, в частности, ёмкость электродвигателя встречается достаточно редко в справочниках.

С помощью математического моделирования можно выявить основные закономерности при коммутации электрических машин. Например, в работе [49] при исследовании процессов отключения ненагруженных синхронных двигателей мощностью 250 и 630 кВт вакуумным выключателем получены КП на зажимах электродвигателей кратностью 5 и 2,9 соответственно. Однако при выполнении экспериментальных исследований КП было установлено, что при отключении аналогичных синхронных электродвигателей максимальная кратность КП составила 6,9 и 6,3 соответственно.

Различие данных, полученных с помощью аналитических исследований на основе математического моделирования, и экспериментальных данных связано с тем, что при математическом описании переходных процессов всегда принимается ряд допущений, например:

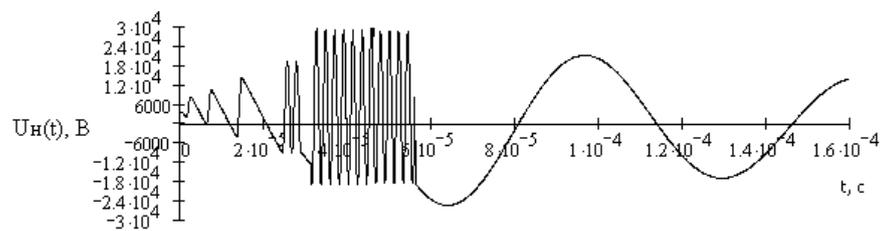
- обмотка электрической машины считается линейной цепью, параметры которой не зависят от величины тока и напряжения;
- все параметры схемы замещения постоянны в течение всего времени протекания переходного процесса вызванного коммутацией и не зависят от частоты;
- значение напряжения сети при частоте сети 50 Гц считается квазипостоянной величиной, равной мгновенному значению напряжения в начальный момент переходного процесса;

- ротор электрической машины неподвижен.

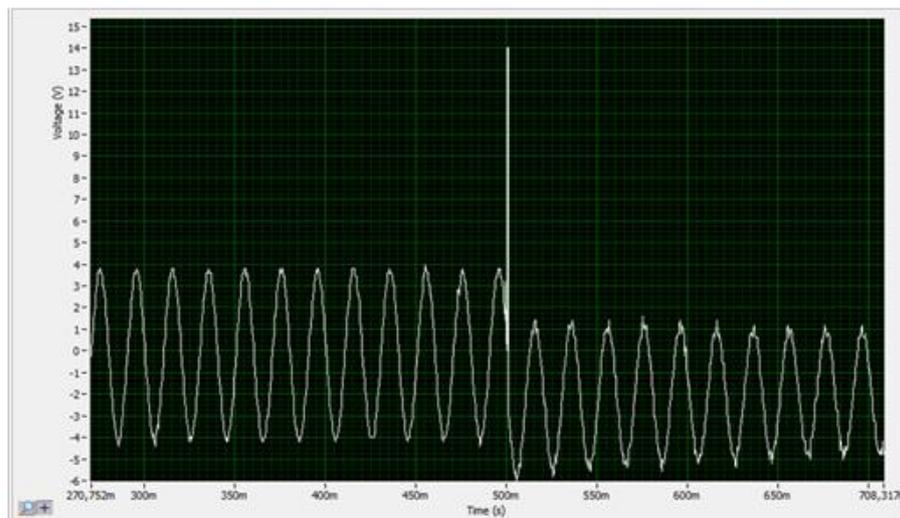
В результате принятых допущений наблюдаются отличия в протекающих процессах при отключении электродвигателей, полученные на основе математического моделирования и реальных измерений.

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены осциллограммы переходных процессов, полученные с помощью математического моделирования процесса отключения асинхронных двигателей мощностью 250 и 630 кВт напряжением 6кВ [49], и осциллограммы, снятые при отключении реальных электродвигателей [59,61].

Из представленных осциллограмм видно, что существенно различаются характеры переходных процессов. Это, в первую очередь, связано с нелинейным характером параметров электродвигателя и наличием ЭДС выбега.

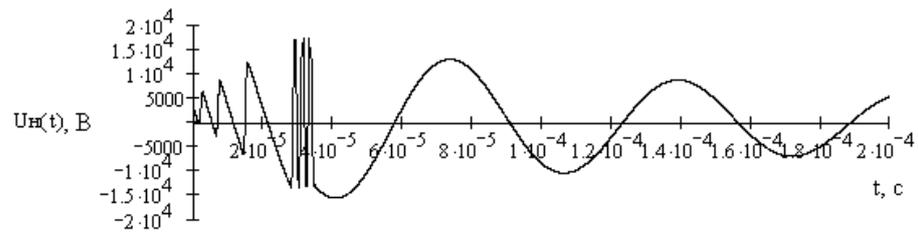


а)

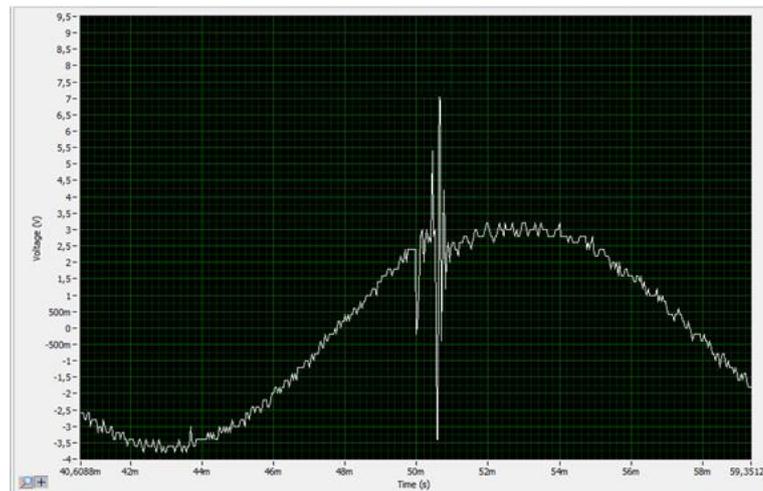


б)

Рисунок 4.1 – Осциллограммы процесса отключения синхронного электродвигателя мощностью 250 кВт: а) осциллограмма, полученная при математическом моделировании  $K_{\max} = 5$ ; б) осциллограмма, полученная при экспериментальном измерении  $K_{\max} = 7$ .



а)



б)

Рисунок 4.2 – Осциллограммы процесса отключения синхронного электродвигателя мощностью 630 кВт: а) осциллограмма, полученная при математическом моделировании  $K_{\max} = 2,9$ ; б) осциллограмма, полученная при экспериментальном измерении  $K_{\max} = 3,16$ .

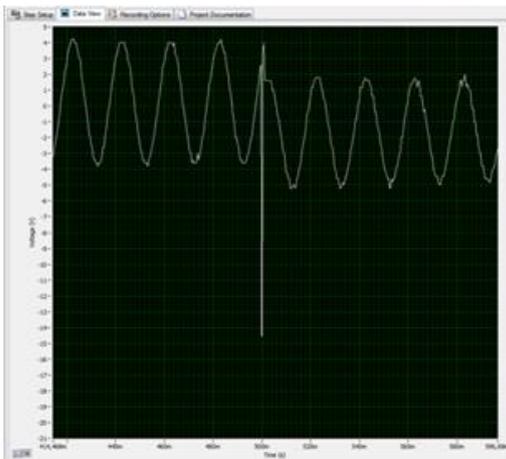
Применение математического моделирования, основанного на использовании любой схемы замещения, требует достоверного математического аппарата расчета перенапряжений, учитывающего большое количество факторов; точных сведений о параметрах схемы замещения конкретного электроприемника с учётом нелинейного характера данных параметров; квалифицированного специалиста; значительных затрат времени при математической оценке перенапряжений для большого количества электроприемников.

*Методы физического моделирования.* Данные методы основаны на измерении перенапряжений, полученных на физической модели, в основу которой положены реальные элементы согласно схеме замещения (активные, индуктивные и емкостные сопротивления).

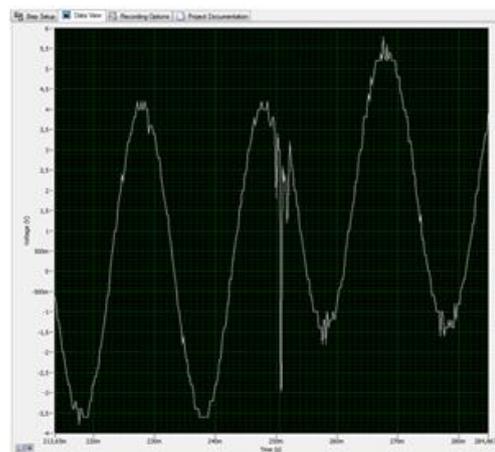
Оценка максимальных перенапряжений для большого количества реальных электроприемников таким методом потребует широкой вариации параметров элементов физической модели, что приведет к значительным затра-

там времени на проведение данных исследований [93].

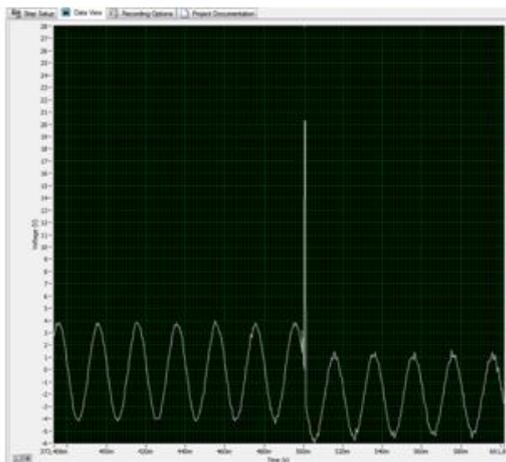
Физическое моделирование позволяет оценить зависимость перенапряжения от ряда основных факторов: типа выключателя, нагрузки, угла коммутации, длины кабельной линии - и не представляет возможным учесть процессы, протекающие в реальной электрической машине, из-за нелинейного характера параметров машины и сочетания всех случайных факторов, которые влияют на величину КП. Осциллограммы, показанные на рисунке 4.3, иллюстрируют, что при отключении одного электродвигателя типа АЭЗ-



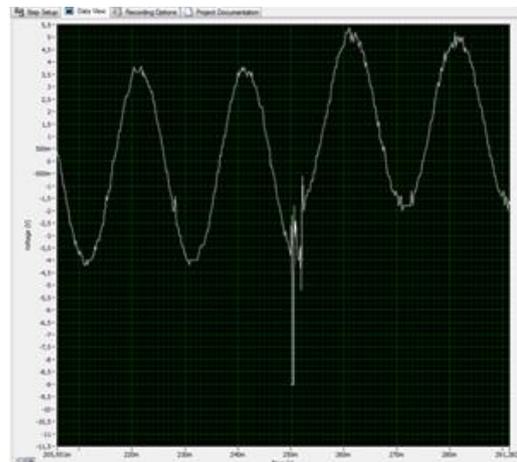
а)  $K_{\max}=5$



б)  $K_{\max}=1,1$



е)  $K_{\max}=7$



е)  $K_{\max}=3$

Рисунок 4.3 – Осциллограммы при отключении электродвигателя АЭЗ-400Л мощностью 250 кВт

400Л мощностью 250 кВт, установленного на экскаваторе ЭКГ-5, зафиксированы перенапряжения различной кратности от  $1,1U_{ном}$  до  $7U_{ном}$ . Это указывает на то, что для получения сведений о закономерности возникновения

максимально возможных КП необходимо использовать методы статистического анализа.

Таким образом, методы физического и математического моделирования позволяют установить общие закономерности возникновения КП, но не позволяют учесть все факторы, влияющие на величину КП в их случайном сочетании.

*Экспериментальный метод оценки КП.* Метод оценки, основанный на непосредственном измерении перенапряжений, позволяет получить реальные данные, которые учитывают сочетание всех факторов, влияющих на величину и характер перенапряжений. Однако для определения максимальных значений КП необходимо произвести большое количество измерений на одном объекте, так как вероятность того, что при однократном измерении зафиксировано максимальное перенапряжение, очень низка.

В реальных условиях эксплуатации электрических машин получение достаточного количества статистических данных не всегда представляется возможным, что в большинстве случаев связано с непрерывностью технологического процесса. В таких случаях фиксация перенапряжений возможна лишь во время плановых коммутаций. Следовательно, такой метод оценки потребует больших затрат времени на сбор статистической информации для оценки максимальной кратности перенапряжений.

*Компьютерное моделирование.* Современные компьютерные программы моделирования переходных процессов в электрических сетях предназначены для линейных цепей постоянного и переменного тока. Для моделирования переходных процессов при коммутации электродвигателей и трансформаторов необходимо разрабатывать специальные программы на базе существующих. Характерным примером являются результаты моделирования, приведенные в третьей главе настоящей диссертационной работы. По сравнению с методами математического и физического моделирования, компьютерное моделирование позволяет получить наиболее достоверные результаты. Основными недостатком данного метода являются большая трудоемкость

по решению поставленных задач применительно к полной системе электропитания промышленного предприятия.

Таким образом, компьютерное моделирование позволяет успешно решать локальные задачи, то есть моделировать КП при коммутации конкретного электроприемника с конкретными параметрами.

*Метод оценки КП основанный на регрессивных уравнениях.* В основу данного метода положены исследования выполненные, Мнухиным А.Г. и Коневским Б.И. [65]. Авторы установили зависимости кратности КП, возникающих в сетях 6 кВ, от угла коммутации вакуумного контактора, длины КЛ и времени коммутации.

По полученным зависимостям достаточно сложно оценить кратность КП, возникающие в системе «выключатель – КЛ – электроприемник», так как не учитываются следующие параметры: тип и мощность электроприемника, сечение кабельных линий, тип коммутационного аппарата и наличие высших гармоник в сети 6 кВ.

#### **4.2.2 Экспресс - методы оценки коммутационных перенапряжений.**

Экспресс - методы оценки КП, разработанные Барышниковым Д.В., основаны на использовании эмпирических кривых, отражающих взаимосвязь между максимальной кратностью перенапряжений, типом выключателя, типом и мощностью синхронного и асинхронного электродвигателей, а также учитывающих тип и мощность трансформаторов, длину и сечение кабельной линии. Данные зависимости представлены на рисунках 4.4, 4.5 и 4.6.

Результаты величины КП, полученные данным методом, отличаются от реальных значений на  $\pm 11\%$  при отключении электрической нагрузки, если в сети отсутствуют высшие гармоники, что вполне приемлемо для оценки и прогнозирования КП как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации систем электропитания.

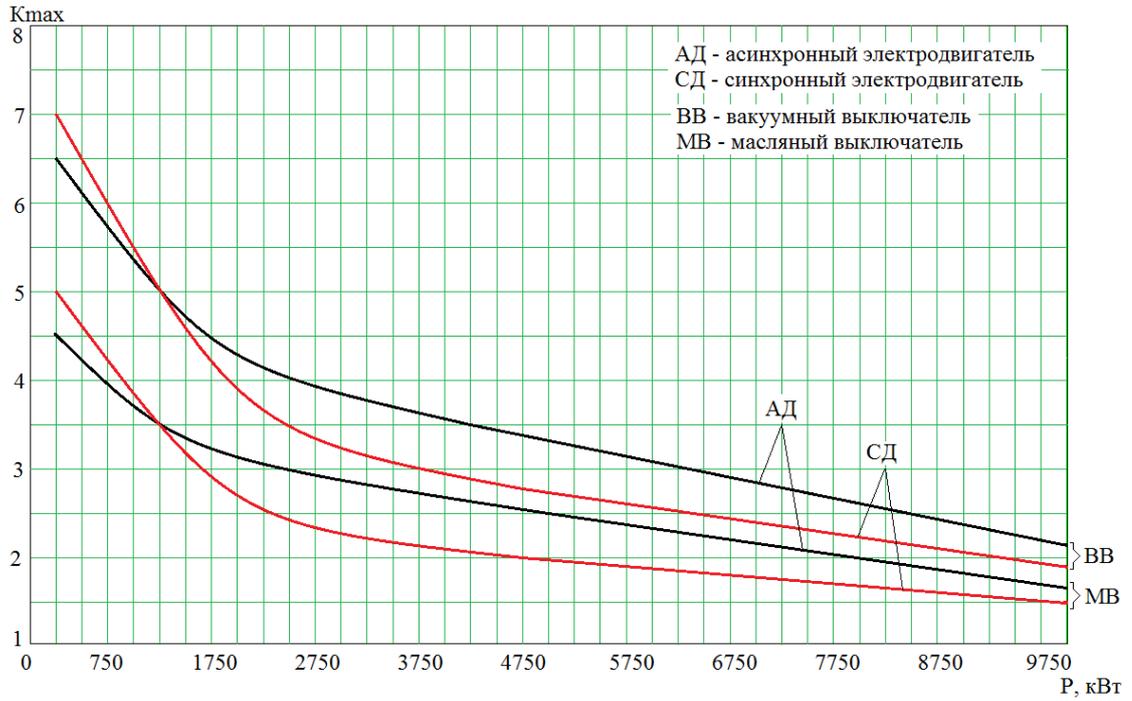


Рисунок 4.4 - Зависимость максимального коэффициента перенапряжения от мощности электродвигателя

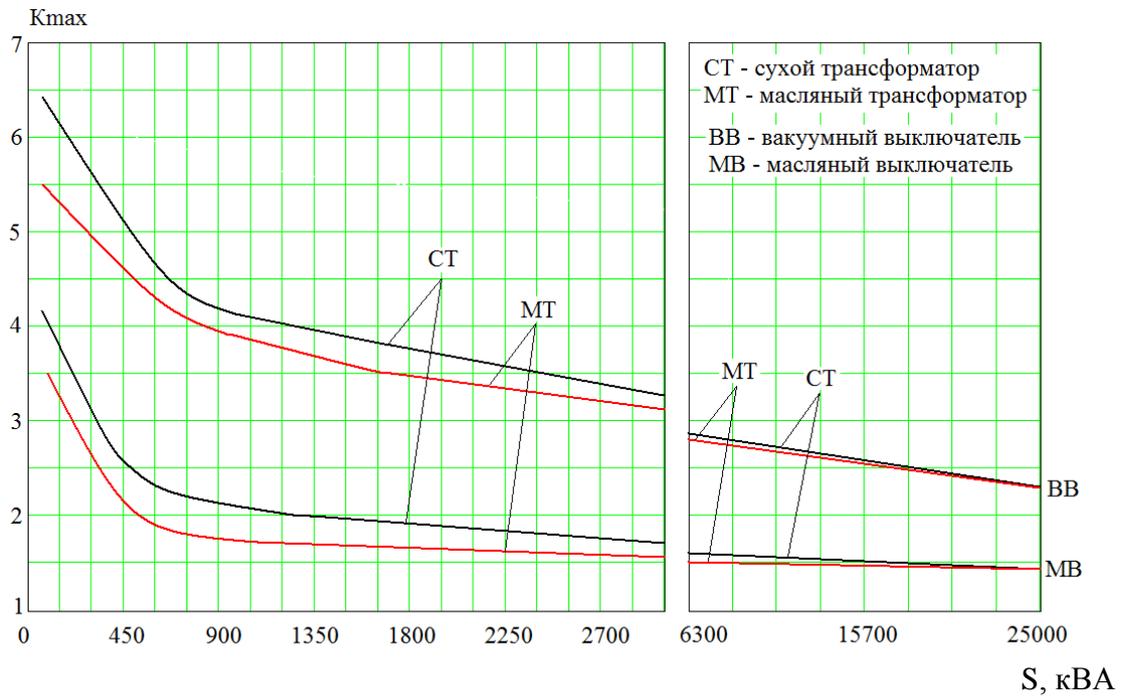


Рисунок 4.5 - Зависимость максимального коэффициента перенапряжения от мощности трансформатора

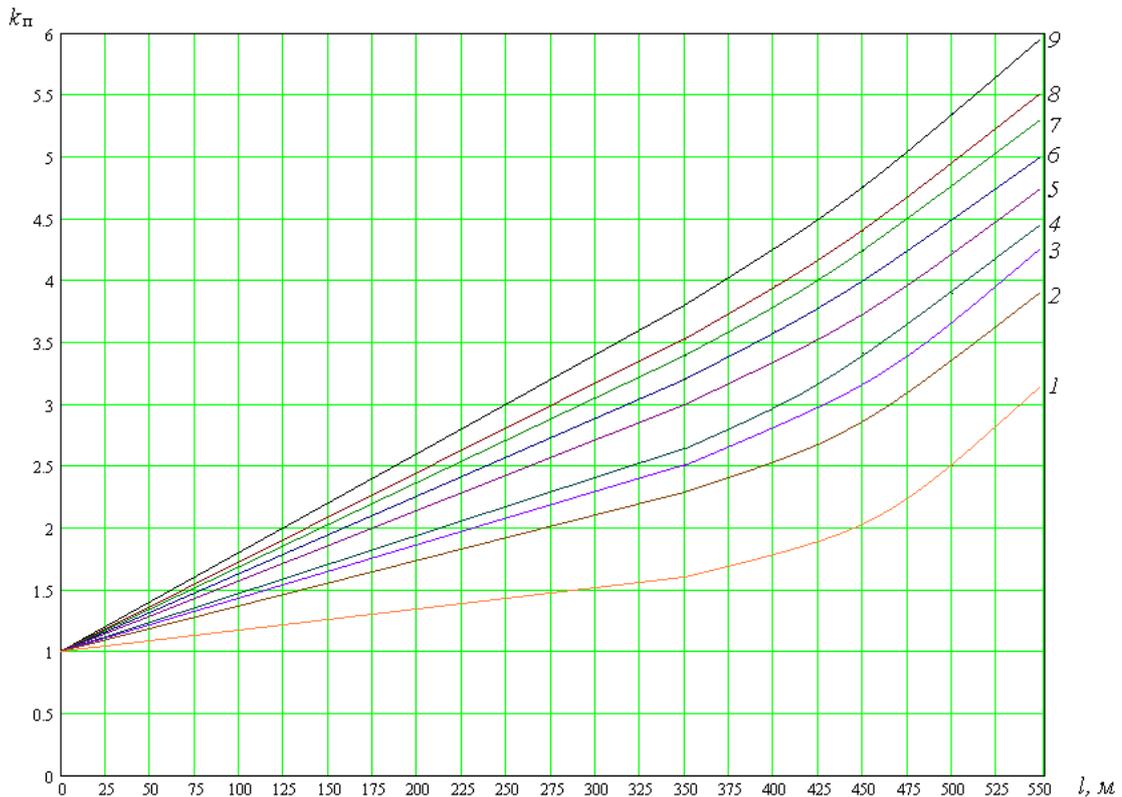


Рисунок 4.6 - Изменение понижающего коэффициента коммутационного перенапряжения в зависимости от длины и сечения кабельной линии. 1 -  $3 \times 25 \text{ мм}^2$ , 2 -  $3 \times 35 \text{ мм}^2$ , 3 -  $3 \times 50 \text{ мм}^2$ , 4 -  $3 \times 70 \text{ мм}^2$ , 5 -  $3 \times 95 \text{ мм}^2$ , 6 -  $3 \times 120 \text{ мм}^2$ , 7 -  $3 \times 150 \text{ мм}^2$ , 8 -  $3 \times 185 \text{ мм}^2$ , 9 -  $3 \times 240 \text{ мм}^2$

Недостатком данного метода является его незавершенность, так как представленные зависимости относятся к вакуумным и масляным выключателям.

Разработанный экспресс - метод [5] не охватывает элегазовые и электромагнитные выключатели, не учитывает класс напряжения сети и один из основных показателей качества электрической энергии – наличие высших гармоник. Дальнейшее развитие экспресс - методов оценки, с учетом типа КЛ, класса напряжения сети и наличия высших гармоник в сетях, получили в работе Гавриловой Е.В. [17]. В результате был разработан комплексный метод оценки КП.

#### 4.2.3 Комплексный метод оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6 - 10 кВ

Обобщенные результаты исследований при коммутации электродвигателей и трансформаторов электромагнитными, масляными, элегазовыми и

вакуумными выключателями выполненные, Гавриловой Е.В., показаны на рисунках 4.7, 4.8 и 4.9.

Изменение величины поправочного коэффициента приведено на рисунке 4.6, а значение коэффициента, учитывающего влияние высших гармоник на КП, отражено на рисунке 4.10.

Отметим, что использование понижающего коэффициента для оценки КП на зажимах нагрузки ограничивается частотой коммутационного импульса. При частоте коммутационного импульса 45 кГц и более понижающий коэффициент не используется. Для расчета кратности КП в месте соединения кабельной линии с выключателем понижающий коэффициент используется независимо от частоты коммутационного импульса.

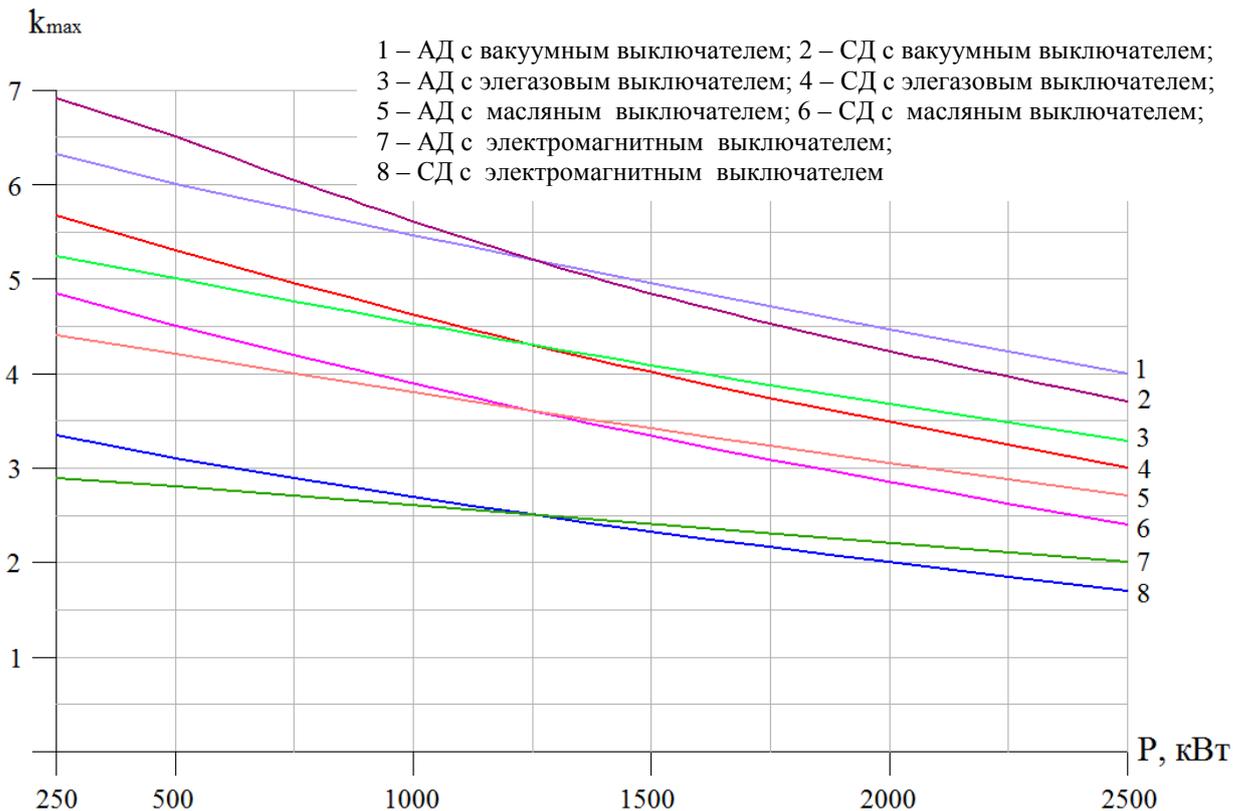


Рисунок 4.7 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для синхронных и асинхронных электродвигателей от типа выключателя

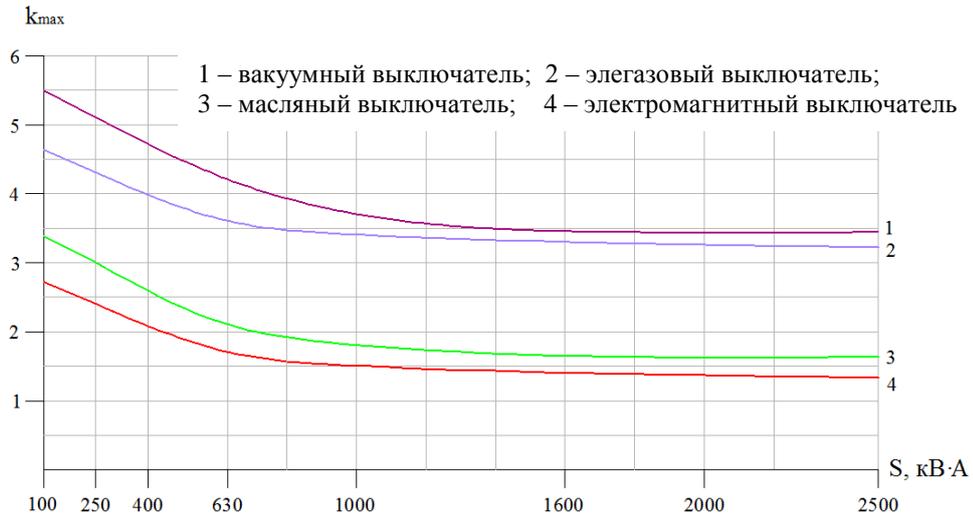


Рисунок 4.8 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для сухих трансформаторов от типа выключателя

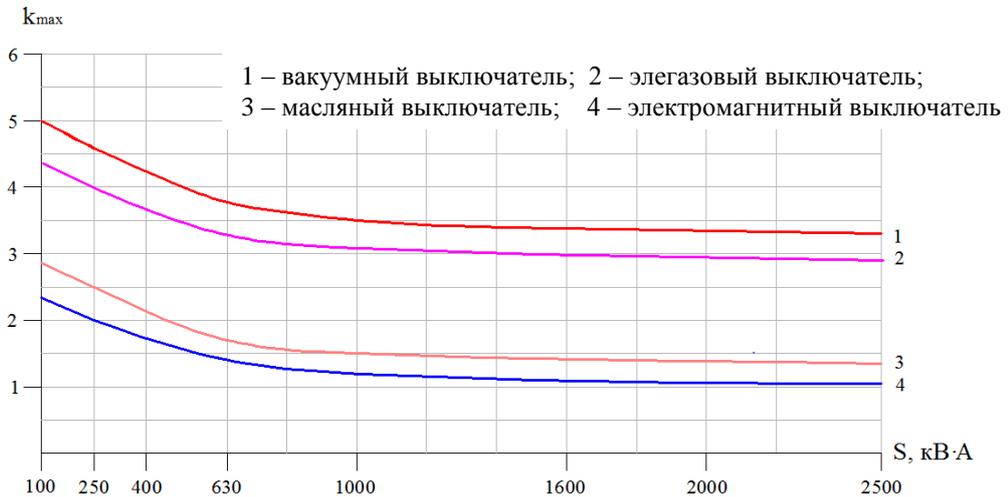


Рисунок 4.9 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для масляных трансформаторов от типа выключателя

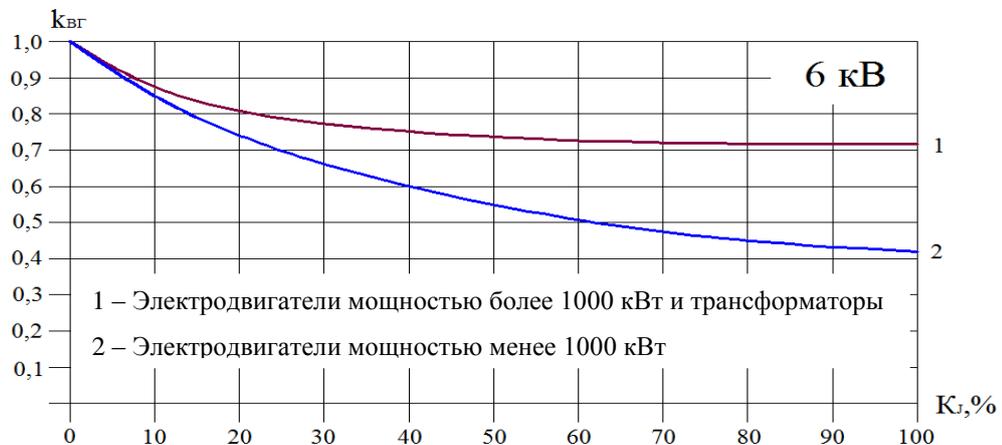


Рис. 4.10 – Зависимость поправочного коэффициента кратности коммутационных перенапряжений от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока

Комплексная методика расчета КП в сети 6 кВ состоит из трех частей. Ниже приведены составные части комплексной методики по оценке и прогнозированию КП в сетях 6 - 10 кВ.

*Оценка перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями, а также при коммутации электродвигателей мощностью более 1250 кВт и 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями.* На рисунке 4.11 приведена расчетная схема для определения КП в точках соединения кабельной линии с выключателем (точка К1) и электродвигателем (точка К2).



Рисунок 4.11 – Расчетная схема для определения кратностей коммутационных перенапряжений

Согласно исследованиям [5,17], при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями частота коммутационного импульса не превышает 38 кГц, следовательно, при оценке КП необходимо использовать понижающий коэффициент. В этом случае расчет кратности КП необходимо выполнить в следующей последовательности:

1. Величина КП на зажимах двигателя или трансформатора при отключении (точка К2) определяется по формулам:

$$K_{п10}^{(2)} = \frac{k_u}{\sqrt{3}} \cdot k_{к.к.6} \cdot K_{max}, \quad (4.1)$$

$$K_{п6}^{(2)} = k_{к.к.6} \cdot K_{max}, \quad (4.2)$$

где  $K_{max}$  – максимальное значение кратности КП на зажимах нагрузки, которое выбирается по кривым, представленным на рисунках 4.2 и 4.3 в зависи-

мости от типа и мощности электродвигателя или трансформатора с учетом типа выключателя.

2. Величина КП при отключении в точке соединения кабельной линии и выключателя (точка К1) определяется по выражениям:

$$K_{пб}^{(1)} = \frac{K_{пб}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (4.3)$$

$$K_{п10}^{(1)} = \frac{K_{п10}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.4)$$

3. Величина КП в сетях 6 - 10 кВ на зажимах электродвигателя или трансформатора при включении (точка К2) определяется по формуле:

$$K_{п.вкл}^{(2)} = \frac{4,2}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.5)$$

4. Величина КП в точке соединения кабельной линии и выключателя при включении (точка К1) определяется по выражению:

$$K_{п.вкл}^{(1)} = \frac{K_{п.вкл}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.6)$$

*Оценка перенапряжений при коммутации электродвигателей мощностью до 1250 кВт и до 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями.* Согласно исследованиям [5,17], при коммутации электродвигателей мощностью до 1250 кВт элегазовыми выключателями и электродвигателей мощностью до 2500 кВт вакуумными выключателями частота коммутационного импульса превышает 45 кГц, следовательно, расчет КП необходимо производить в следующей последовательности:

1. Величина КП на зажимах электродвигателя при отключении (точка К2) определяется по формуле:

$$K_{п.б}^{(2)} = \frac{K_{max}}{k_{вг}}, \quad (4.7)$$

$$K_{п.10}^{(2)} = \frac{k_u \cdot K_{max}}{\sqrt{3} \cdot k_{вг}}. \quad (4.8)$$

2. Величина КП при отключении в точке соединения кабельной линии и выключателя (точка К1) определяется по выражению:

$$K_{п6}^{(1)} = \frac{K_{п6}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (4.9)$$

$$K_{п10}^{(1)} = \frac{K_{п10}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.10)$$

3. Величина КП на зажимах двигателя и выключателя при включении (точка К2 и К1) определяется по формулам (4.5) и (4.6).

Таким образом, для обоснования и выбора необходимого метода оценки КП в сетях 6 кВ шахт и рудников необходимо определить следующее:

- какие типы высоковольтных выключателей эксплуатируются в сетях 6 кВ шахт и рудников;
- установить наличие высших гармоник в сетях 6 кВ шахт и рудников.

#### **4.3 Обоснование и выбор метода оценки КП в сетях 6 кВ шахт и рудников**

Анализ состава парка высоковольтных выключателей эксплуатируемых на рудниках ОАО «Уралкалий», АО «Алроса» и угольных шахт Кузбасса, показывает, что в настоящее время доля вакуумных выключателей составляет около 93%. На масляные выключатели, воздушные и электромагнитные выключатели приходится соответственно – 4%, 2% и 1%. Планы реконструкции и модернизации шахт и рудников на ближайшие 2 года показывают, что до 2014 года масляные и воздушные выключатели будут заменены на вакуумные. Следовательно, основным видом выключателей в настоящее

время и в ближайшем будущем в сетях 6 кВ шахт и рудников будут использоваться вакуумные выключатели.

Таким образом, при выборе метода оценки и прогнозирования КП в системах электроснабжения шахт и рудников следует ориентироваться на вакуумные выключатели.

Согласно правилам безопасности шахт и рудников, нормативных документов, Правил устройства электроустановок, правил эксплуатации электроустановок потребителей в подземных условиях используются распределительные сети 6 кВ [67,75,76,74,85]. Отметим, что последнее время ведутся работы в проектных организациях и в НИИ по использованию распределительных сетей напряжением 10 кВ. Это в первую очередь связано с соблюдением требований ГОСТ связанный с отклонением напряжения в распределительных сетях 6-10 кВ [26].

Исследования показывают, что современные шахты имеют значительную протяженность подземных выработок. Длина КЛ напряжением 6кВ достигает нескольких десятков километров. Использование современного мощного технологического оборудования (проходческие и добычные комплексы, конвейерные линии) приводит к тому, что отклонение напряжения в удаленных точках системы электроснабжения 6кВ шахт и рудников может достигать предельно допустимых значений а в определенных случаях (пуск двигателей) превышает их.

Например, для шахт Кузбасса характерны отклонения напряжения в пределах от  $-7\div$  до 17,6%, а во время пуска от -11,3 до +5,2% [14]. Указанные отклонения напряжения превышают нормально допустимые значения и предельно допустимые значения, которые соответственно равны для сетей 6 кВ – 5% и 10%. Использование распределительных сетей 10 кВ позволит привести в норму отклонения напряжения, как в нормальном, так и в пусковых режимах эксплуатации электрооборудования. Следовательно, при выборе метода оценки КП необходимо учитывать, что в настоящее время основным

классом напряжения является 6 кВ, а в перспективе в шахтах и рудниках могут эксплуатироваться распределительные сети напряжением 10 кВ.

Исследование распределительных сетей 0,4÷6 кВ на наличие высших гармоник показало, что в сетях напряжением 0,4; 0,69 и 1,14 кВ коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения не превышает 3,5 %, что соответствует требованиям ГОСТ 13109-97. В то же время коэффициент искажения синусоидальности кривой тока изменяется в широком диапазоне от 15,3% до 44,7%. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока не нормируется. Однако наличие высших гармоник тока оказывает негативное влияние на систему управления технологическим процессом, вызывает дополнительный нагрев электродвигателей и трансформаторов. Основным источником высших гармоник являются тиристорные и частотные преобразователи, используемые в современных электроприводах технологических установок [95,9,29].

Гармонический состав тока и напряжения в сетях 6 кВ показывает, что коэффициент несинусоидальности кривой напряжения и тока не превышает 2% и 5% соответственно. Это связано с тем, что трансформаторы мощностью до 2500 кВА напряжением 6 кВ обладают высокой степенью подавления высших гармоник. Подробные исследования по данному вопросу изложены в работе Скакунова Д.А. [84].

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что на современном этапе развития систем электроснабжения шахт и рудников используются распределительные сети 6 кВ, в которых практически отсутствуют высшие гармоники тока и напряжения. Перспективное использование сетей 10 кВ в шахтах и рудниках позволит не только решить проблему с отклонением напряжения но и поставить другую задачу, связанную с подавлением высших гармоник в сетях 10 кВ, так как распределительные сети 10 кВ делают экономически обоснованным использование конвейерного транспорта с высоковольтными частотно регулируемые приводами. Положительный опыт эксплуатации подобных конвейерных линий получен на открытых горных рабо-

тах [18,91]. Поэтому при использовании распределительных сетей 10 кВ в шахтах и рудниках, при выборе методов оценки в данных сетях необходимо учитывать наличие высших гармоник.

Вышеизложенный материал показывает, что для распределительных сетей 6 кВ наиболее приемлемым методом оценки КП являются экспресс – методы, а для сетей 10 кВ – комплексный метод оценки КП.

Выше указанные методы оценки КП, которые используются для общепромышленных сетей можно применить к распределительным сетям шахт и рудников с учетом нижеследующих факторов.

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 (рис.2.5), т.к. относительная погрешность не превышает 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 (рис.2.1). Кратность перенапряжений при коммутации трансформаторов в подземных условия вакуумными выключателями выше в среднем на 28,5%. Следовательно, для оценки и прогнозирования КП в сетях 6-10 кВ шахт и рудников с использованием экспресс – методов и комплексного метода коэффициент максимальной кратности ( $K_{max}$ ) для электродвигателей остается неизменным, а для трансформаторов должен быть выше в 1,285 раза. То есть

$$K_{max.ш} = 1,285 \cdot K_{max.тр} \quad (4.11)$$

где  $K_{max.тр}$  - значение максимальной кратности перенапряжений которое выбирается по кривым представленным на рисунке 4.8. В остальном последовательность расчетов кратности КП применительно к сетям 6-10кВ шахт и рудников остается аналогичной представленной соответственно в экспресс – методах и комплексных методах оценки КП.

## ВЫВОДЫ

На основе вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. Для оценки КП в современных систем электроснабжения шахт и рудников наиболее приемлемым являются экспресс – методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений.

2. В случае использования в шахтах и рудниках распределительных сетей напряжением 10 кВ, для оценки КП необходимо использовать комплексный метод.

3. При использовании указанных методов в распределительных сетях 6-10 кВ шахт и рудников необходимо учитывать, что кратность перенапряжений при коммутации сухих трансформаторов выше в 1,285 раза по отношению к аналогичным трансформаторам, которые эксплуатируются в общепромышленных сетях. В остальном последовательности расчета КП с помощью выбранных методов остается неизменной.

## 5 РАЗРАБОТКА И ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ КП В СЕТЯХ 6 КВ ШАХТ И РУДНИКОВ

*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.*

### 5.1 Общие сведения

Как было отмечено в первой главе, одним из источников, создающих перенапряжения в сети, является выключатель. Результаты исследования, представленные во второй и третьей главах, показывают, что КП могут возникать как при включении, так и при его отключении даже в том случае, если выключатель работает идеально: т.е. замыкание и размыкание контактов происходит мгновенно (без предпробоев). Однако в реальных условиях работа выключателя может отличаться от идеальных условий, когда могут возникать следующие явления [121,109,122,117,116,107]:

- срез тока до его нулевого значения;
- пробой межконтактного промежутка в процессе включения и отключения;
- гашение дуги высокочастотного тока переходного процесса.

Срез тока – внезапное снижение тока к нулю до его естественного нулевого значения. Это связано с нестабильностью дуговой плазмы, высокочастотными колебаниями тока и возможностью восстановления диэлектрической прочности после прерывания тока. Все выключатели обладают этими свойствами в различной степени (масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные) [119,120]. Для элегазовых выключателей характерно, что дуга становит-

ся нестабильной при относительно низкочастотном характере изменения тока, приводя в дальнейшем к срезу в течении 5...10 мкс. Вакуумные же выключатели создают нестабильную дугу при высокочастотном характере изменения тока с последующим очень быстрым его прерыванием [108].

Срез тока зависит от многих факторов: величина отключаемого тока, характеристики цепи, сосредоточенная емкость параллельно выключателю, момент отделения контактов, конструкция аппарата [120,110]. Как показали исследования, отраженные во второй главе, КП имеет статистическую природу.

В момент отключения индуктивной нагрузки (двигатели или трансформаторы) вакуумным или элегазовым выключателем наблюдается эффект «среза тока», т.е. гашение дуги между контактами выключателя происходит не в точке, где  $i=0$ , а в точке, где  $i=i_0$ . В этом случае энергия магнитного поля обмотки двигателя или трансформатора, обусловленная остаточным током  $i_0$ , будет равна:

$$W_M = \frac{i_0^2 \cdot L}{2}, \quad (5.1)$$

где  $i_0$  – остаточный ток или срез тока, А

$L$  – индуктивность обмотки, Гн.

Магнитная энергия, запасённая в обмотках двигателя или трансформатора, будет преобразовываться в энергию электрического поля ёмкости  $C$  (рисунок 5.1), т.к. любая обмотка обладает определённой ёмкостью по отношению к земле или по отношению к другой обмотке. Величина энергии электрического поля оценивается выражением:

$$W_Э = \frac{U^2 \cdot C}{2}. \quad (11.2)$$

Обмен энергиями между  $L$  и  $C$  сопровождается высокочастотными колебаниями (их частота может достигать 520 кГц) и ростом напряжения на зажимах двигателя или трансформатора, т.е. к появлению перенапряжений, величина которых может достигать семикратных значений. Это может по-

служить причиной пробоя изоляции обмоток двигателя, трансформатора или разделок кабеля. Выражение для напряжения, возникающего на зажимах двигателя или трансформатора в момент отключения, можно получить из соотношения [12]:

$$W_M = W_3,$$

т.е.,

$$U = i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5.3)$$

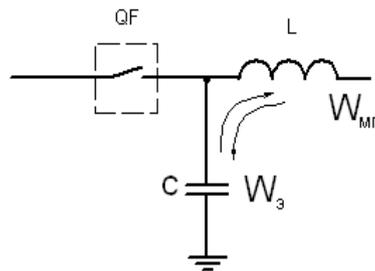


Рисунок 5.1 – Обмен энергиями между индуктивностью обмотки двигателя и емкостью обмотки по отношению к земле

Выражение (5.3) показывает, что для ограничения амплитуды перенапряжений необходимо увеличить ёмкость между обмотками двигателя (трансформатора) или между обмотками и землёй или уменьшить величину среза тока. Однако для эффективного подавления (сглаживания) перенапряжений недостаточно ограничивать амплитуду перенапряжения, необходимо ограничивать скорость нарастания напряжения (эскалация напряжения).

Скорость нарастания напряжения  $du/dt$  можно найти из выражения (5.3), взяв производную [20]

$$\frac{du}{dt} = \frac{i_0}{C}. \quad (5.4)$$

т.е. чем больше ёмкость между обмотками двигателя (трансформатора) или между обмотками и землёй, и чем меньше срез тока, тем медленнее будет нарастать напряжение на зажимах двигателя (трансформатора), и тем самым негативное воздействие высокого напряжения на изоляцию электроприемника будет сведено к минимуму.

Время существования коммутационных перенапряжений связано с временным преобразованием магнитной энергии в электрическую и наоборот.

Преобразование магнитной энергии в электрическую и наоборот будет происходить до тех пор, пока вся энергия не преобразуется в тепловую энергию, которая идёт на нагрев обмоток двигателя или трансформатора, на перемагничивание и нагрев магнитопровода за счет вихревых токов. Для сокращения времени существования КП и ограничения амплитуды коммутационного импульса в процесс преобразования энергии необходимо ввести «поглотитель» энергии. В роли «поглотителя» энергии можно использовать резистор, который подключается последовательно с ёмкостью или параллельно ей.

В первом случае резистор должен иметь постоянное сопротивление, а во втором случае переменное, которое с увеличением напряжения уменьшают своё внутреннее сопротивление.

Таким образом, в настоящее время для ограничения КП используют способ, связанный с увеличением присоединенной емкости к зажимам защищаемого объекта (RC-цепи, рисунке 5.2) или резким увеличением проводимости обмотки электродвигателя или трансформатора по отношению к земле (рис. 5.3).

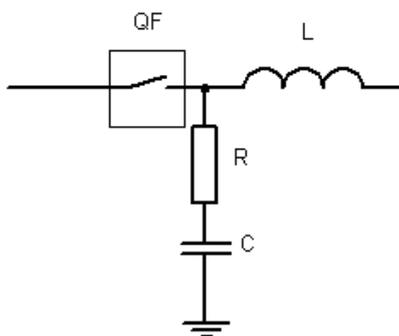


Рисунок 5.2 – Использование RC-цепей для ограничения КП

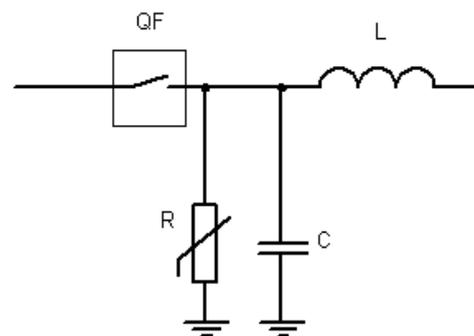


Рисунок 5.3 – Использование нелинейного резистора для ограничения КП

На основе указанных способов ограничения КП используют следующие устройства и естественные средства: нелинейные ограничители перена-

пряжений (ОПН), RC-ограничители и RC-гасители, а так же кабельные линии.

## **5.2 Анализ существующих средств и устройств ограничения коммутационных перенапряжений**

### **5.2.1 Кабельные линии**

Принято считать [39,65,78], что ограничение КП может быть достигнуто нормированием минимальной длины кабеля между высоковольтным выключателем и коммутируемой нагрузкой. Защитное действие кабельной линии основано на уменьшении волнового сопротивления коммутируемого контура за счет собственной емкости кабеля. Параметры кабеля, выключателя и индуктивной нагрузки являются определяющими в формировании КП [49].

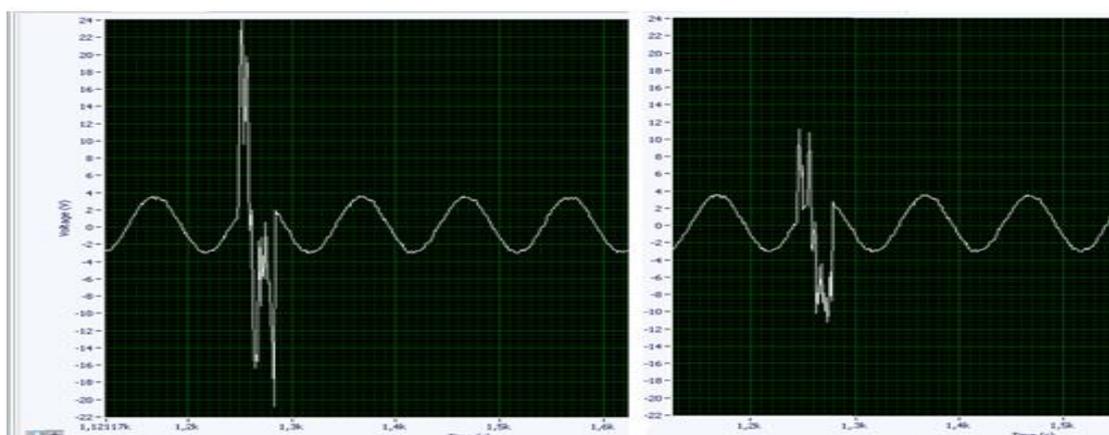
Например, считается, что увеличение емкости системы «кабель – электроприемник» и активно-индуктивного сопротивления кабеля приводит к снижению амплитуды и крутизны импульсов КП, а также уменьшает число повторных зажиганий дуги в выключателе. В работе [78] доказывается, что при длине кабельной линии более 100м между выключателем и нагрузкой перенапряжения из-за среза тока в выключателе не возникают. Данное заключение было сделано без учета частоты коммутационного импульса.

В институте Горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского Федерального университета на кафедре «Электрификация горно-металлургического производства» группой исследователей при участии автора данной диссертации были получены иные результаты. Установлено, что при частоте коммутационного импульса свыше 45кГц кабельная линия из «сглаживающего» фильтра превращается в «запирающий» фильтр. Это связано с тем, что при высокой частоте коммутационного импульса ( $f \geq 45$  кГц) возрастает продольное индуктивное сопротивление кабеля, а также увеличивается его активное продольное сопротивление за счет поверхностного эффекта. Это приводит к тому, что на зажимах электродвигателя или транс-

форматора при их отключении от сети вакуумным или элегазовым выключателем возникают максимальные КП, а в месте соединения кабельной линии с выключателем КП минимальные [63,61].

Данный эффект иллюстрируется с помощью осциллограмм, представленных на рисунке 5.4.

Из представленных осциллограмм видно, что на зажимах электродвигателя кратность перенапряжения составляет  $4,9U_{\text{НОМ}}$ , а на зажимах выключателя кратность перенапряжения равна  $2,4U_{\text{НОМ}}$ , то есть амплитуда коммутационного импульса снижается по мере удаления в сторону выключателя от индуктивной нагрузки. Частота коммутационного импульса составляла 63 кГц при длине кабельной линии равной, 370м, сечением жилы кабеля  $70 \text{ мм}^2$ . Детальное изучение влияния длины и сечения кабельной линии и частоты коммутационного импульса на величину и характер КП изложено в работе [5].



а)

б)

а) коммутационные перенапряжения на зажимах электродвигателя;

б) коммутационные перенапряжения на зажимах выключателя

Рисунок 5.4 – Осциллограммы отключения синхронного электродвигателя мощностью 500 кВт с помощью вакуумного выключателя

Таким образом, использование кабельной линии как средства ограничения КП возможно, если частота коммутационного импульса не превышает 45 кГц. В противном случае кабельная линия не способствует снижению кратности КП на зажимах нагрузки. Исследования КП, выполненные в системах электроснабжения 6 кВ шахт и рудников, показали, что при коммута-

ции трансформаторов мощностью до 1600 кВА частота коммутационного импульса не опускается ниже 53 кГц, т.е. для основного количества передвижных трансформаторных подстанций, эксплуатируемых в шахтах и рудниках, кабельные линии как средства защиты от КП рассматривать нецелесообразно.

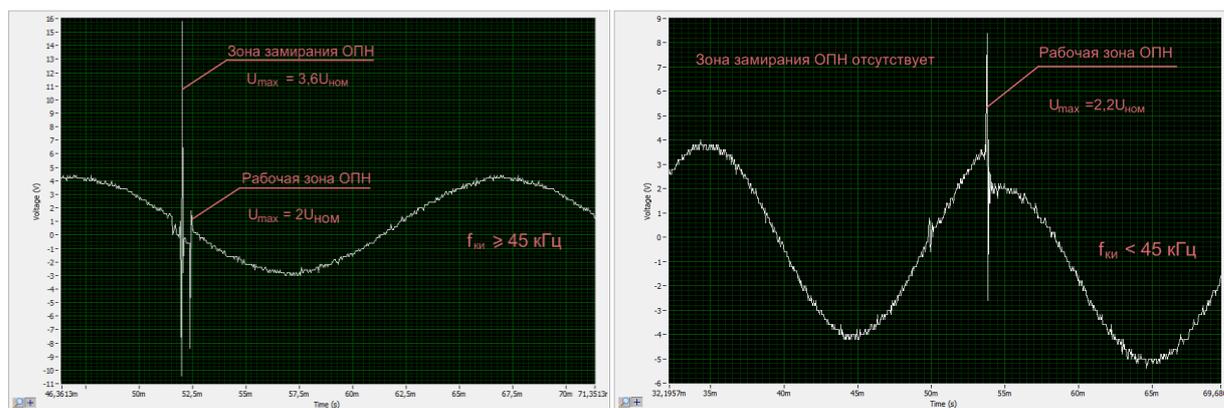
### 5.2.2 Нелинейные ограничители перенапряжений

Для защиты электродвигателей и силовых трансформаторов от КП широко используются нелинейные ограничители перенапряжений.

Анализ технических характеристик современных ОПН, которые эксплуатируются в сетях 10 кВ, показывает, что остаточное напряжение на ОПН в момент его срабатывания может изменяться от 22 до 24 кВ, а для ограничителей перенапряжений в сетях 6 кВ остаточное напряжение изменяется от 13 до 14 кВ [2,33,34]. Следовательно, современные ОПН ограничивают КП до уровня  $(2,2 - 2,4)U_{ном}$ . Подобный уровень ограничения КП представляет серьезную опасность для изоляции электродвигателей, так как превышает допустимую кратность перенапряжения, равную 1,8, и не оказывает опасного влияния на изоляцию обмоток силовых трансформаторов, так как допустимая кратность перенапряжений для трансформаторов составляет 2,8, что выше уровня ограничения КП ОПНом [45,63].

Последние исследования, выполненные в Сибирском Федеральном университете при участии автора, показали, что при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц в работе ОПН наблюдается «зона замирания». «Зона замирания» характеризуется тем, что ОПН не реагирует на возникновение перенапряжения, амплитуда которого в несколько раз может превышать порог срабатывания (уровень ограничения) ОПН [59]. Частота коммутационного импульса свыше 45 кГц наблюдается при коммутации электродвигателей мощностью от 200 кВт до 2500 кВт и трансформаторов мощностью до 1600 кВА эксплуатируемых в шахтах и рудниках. Это может привести к пробое изоляции обмоток высоковольтных электродвигателей или

трансформаторов. Длительность «зоны замиранья», как правило, не превышает 2 - 3 периодов колебаний напряжения коммутационного импульса и составляет менее  $4 \cdot 10^{-5}$  с [47]. Данный эффект иллюстрируется осциллограммами, представленными на рисунке 5.5.



а)

б)

- а) отключение синхронного двигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем;  
 б) отключение синхронного двигателя мощностью 2500 кВт элегазовым выключателем

Рисунок 5.5 – «Зона замиранья» в работе ОПН

Следующим недостатком в работе ОПН является низкая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю.

Установлено [19,83], что в режиме однофазного замыкания на землю, которое сопровождается перемежающейся дугой, кратность перенапряжения может превышать напряжение сети в 3,5 - 4 раза. Частота, с которой происходит горение дуги, может достигать 5 - 7кГц. Это указывает на то, что частотная характеристика дуги позволяет избежать «зоны замиранья» в работе ОПН. ОПН может сработать, если перенапряжение в режиме однофазного замыкания на землю будет больше порога срабатывания ограничителя.

Перенапряжения в режиме однофазного замыкания на землю, как правило, возникают на неповрежденных фазах сети. В момент горения дуги срабатывают ОПН, подключенные к неповрежденным фазам, что приводит к кратковременному короткому замыканию через землю и ОПН.

Несвоевременное отключение линий с однофазным замыканием на землю за счет низкой селективности защит может привести к термическому

разрушению ОПНов. Это предположение подтверждается статистическими данными о наработках на отказ ОПНов, которые эксплуатируются в сетях 6 - 10кВ горных предприятий [59].

Например, средняя наработка на отказ для нелинейных ограничителей перенапряжений, которые эксплуатируются на угольных разрезах Красноярского края, составляет 14 месяцев. Характерный вид термического разрушения ОПН представлен на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Характерный вид термического разрушения ОПН в режиме однофазного замыкания на землю

Таким образом, основными недостатками в работе ОПН является «зона замирания» при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц и низкая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю, что приводит к низкой эффективности защиты от КП трансформаторов и электродвигателей, эксплуатируемых в сетях 6 кВ шахт и рудников.

### **5.2.3 Устройства на базе RC-цепей – RC-ограничители и RC-гасители**

Принцип работы RC-ограничителей и RC-гасителей основан на уменьшении волнового сопротивления защищаемого объекта за счет увеличения присоединенной емкости. В работе RC-ограничителей и RC-гасителей не обнаружена «зона замирания», так как за счет его емкости устройства частота коммутационного импульса не превышает 3,5 кГц.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений данных устройств находится в диапазоне  $(1,5 - 1,7)U_{ном}$ , что ниже допустимого уровня перенапряжений, которые могут выдержать изоляции высоковольтных электродвигателей и трансформаторов.

Параметры RC-цепей, используемых в конструкции RC-ограничителей RC-гасителей, эксплуатируемых в общепромышленных сетях 6 – 10 кВ и сетях 6 кВ шахт и рудников соответственно составляет  $R=50$  Ом,  $C=0,25$  мкФ и  $R=50$  Ом,  $C=0,1$  мкФ.

В RC-ограничителях RC-цепи собраны по схеме «звезда с заземленной нейтральной точкой», поэтому недостатком RC-ограничителя является увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю. В режиме однофазного замыкания на землю один RC-ограничитель генерирует в сеть добавочный емкостной ток, величина которого составляет 0,82А и 0,33 А соответственно в общепромышленных сетях и сетях шахт и рудников. Увеличение емкостного тока ОЗЗ негативно отражается на условиях электробезопасности, так как с ростом тока однофазного замыкания на землю увеличивается напряжение прикосновения и шага.

Массовое использование RC-ограничителей может привести к изменению режима нейтрали сети 6 - 10 кВ с изолированного на компенсированный режим нейтрали, а в сетях с компенсированным режимом нейтрали потребуются установка более мощных дугогасящих реакторов, что влечет дополнительные экономические затраты. Это накладывает определенное ограничение на их использование.

Например, среднее значение тока ОЗЗ в узлах электрических нагрузок напряжением 6 кВ шахт и рудников составляет 25 – 28 А. Допустимое значение тока ОЗЗ, согласно ПУЭ, в сетях 6 кВ не должно превышать 30А. Следовательно, количество RC-ограничителей не превысит 15 единиц, что гораздо меньше количества эксплуатируемых трансформаторов и электродвигателей.

Следует отметить, что RC-ограничители могут быть подвержены термическому разрушению из-за длительного воздействия токов высших гармоник.

Вследствие протекания токов высших гармоник емкостное сопротивление уменьшается и на резисторе возрастает мощность рассеяния. При длительном протекании токов высших гармоник резисторы интенсивно нагреваются и вызывают термическое разрушение RC-ограничителя. С учетом того, что RC-цепи собраны по схеме «звезда» с заземленной нейтральной точкой, по фазным RC-цепям может протекать весь спектр токов высших гармоник, что способствует более интенсивному нагреву RC-ограничителя.

Например, опыт эксплуатации RC-ограничителей для подавления КП на печных трансформаторах оказался отрицательным. Средняя наработка на отказ составляла 18 месяцев, так как при работе печных трансформаторов генерируется широкий спектр высших гармоник тока. Длительность существования высших гармоник тока ограничивается временем плавки, которое изменяется от 1,5 до 3 часов [60].

На рисунке 5.7 приведен пример термического разрушения RC-ограничителя.



Рисунок 5.7 – Характерный вид термического разрушения RC-ограничителя

Таким образом, главным недостатком RC-ограничителя является его влияние на величину и характер тока однофазного замыкания на землю и как следствие, на условия электробезопасности, недостаточная термическая устойчивость к воздействию токов высших гармоник и ограничение по количеству используемых устройств в электрически связанных сетях, что не позволяет обеспечить защитой от КП все трансформаторы и электродвигатели, подключенные к одному узлу электрической нагрузки.

Принцип действия RC-гасителя аналогичен принципу действия RC-ограничителя. Отличительной чертой RC-гасителя от RC-ограничителя является схема соединения RC-цепей. RC-цепи RC-гасителей собраны по схеме «треугольник». Это позволяет ограничить спектр протекающих токов по RC-цепям. По RC-цепям не будут протекать гармоники кратные трем, что приводит к повышению термической устойчивости RC-гасителя высшим гармоникам тока. Соединение RC-цепей, собранных по схеме «треугольник», не оказывает влияния на величину и характер тока однофазного замыкания на землю.

Таким образом, RC-гасители более устойчивы к термическому воздействию к токам высших гармоник и не оказывают влияния на величину и характер тока однофазного замыкания на землю. Однако габаритные показатели RC-гасителей превышают габариты RC-ограничителей в 2 – 2,5 раза, что затрудняет их установку в условиях шахт и рудников.

Анализ материала, изложенного в разделе 5.1 и 5.2, показывает, что современные устройства защиты от КП ограничивают амплитуду, скорость нарастания напряжения и частоту коммутационного импульса за счет изменения входных параметров защищаемого объекта. Нелинейные ограничители перенапряжений в момент возникновения напряжения снижают входное активное сопротивление, а RC-ограничители и RC-гасители увеличивают входную емкость защищаемого объекта.

Дальнейшее развитие устройств защиты от КП, связанное с изменением входных параметров защищаемого объекта будет ограничено параметрами системы электроснабжения. Например, значительное увеличение емкости

РС-цепей, как было отмечено выше, может привести к росту тока однофазного замыкания на землю, что негативно отразится на условиях электробезопасности и может привести к изменению режима нейтрали сети [83,98].

Другим способом ограничения КП является снижение величины среза тока.

Снижение величины среза тока в настоящее время достигается за счет подбора специальных материалов для контактов вакуумных или элегазовых выключателей.

В связи с этим наибольшее практическое применение нашел контактный материал CuCr. Следует отметить, что контактный материал CuCr в отличие от других контактных материалов по параметрам: отключающей способности и восстановлению диэлектрической прочности промежутка между контактами; устойчивость к эрозии; срез тока при его переходе через нуль и переходному сопротивлению контактов в течении срока службы на порядок превосходит другие контактные материалы и пригоден почти для всех коммутационных задач [30]. Кроме этого можно достичь превосходных коммутационных характеристик для разных коммутационных задач путем добавки всего лишь доли процентов примесей. К примеру, добавка Te 0,1 - 4% уменьшает эрозию [115,111], добавка Вi от 2,5 до 15% уменьшает срез тока [118], а при добавке С от 0,18 до 1,8% снижается содержание кислорода в металле [105]. Для улучшения других коммутационных характеристик необходимы добавки W, Si, Zr или Sb и других [106,114,113,104].

Снижение величины среза тока можно добиться не только за счет контактных материалов, но и за счет компенсации индуктивной составляющей среза тока.

Развитие данной идеи и практическая её реализация изложена в ниже следующем материале.

### 5.3 Ограничение коммутационных перенапряжений на основе компенсации реактивной мощности

#### 5.3.1 Физические процессы, возникающие при отключении трансформаторов с учетом компенсации тока холостого хода

Исследования КП в общепромышленных сетях 6 – 10 кВ, выполненные авторами [16,5,44], показали, что перенапряжения представляют опасность для изоляции трансформаторов и электродвигателей, если они отключаются от сети в режиме холостого хода или близком к нему. Результаты исследований во второй главе подтверждают, что данные закономерности соблюдаются и в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников.

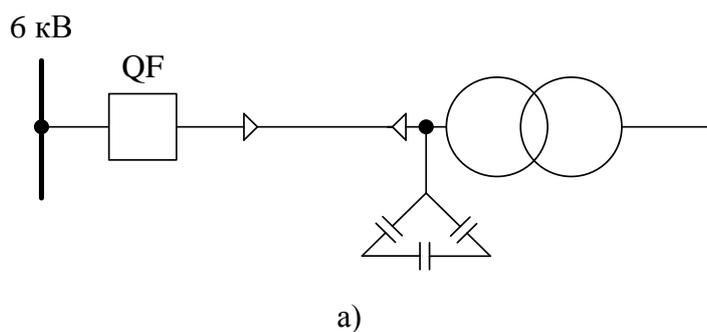
Максимальные кратности КП наблюдаются при отключении неразвернувшихся электродвигателей [30] и в режиме однофазного замыкания на землю [45,56,62].

В рассматриваемых случаях ток, протекающий по обмоткам трансформатора или электродвигателя, имеет в основном индуктивный характер. Очевидно, что и срез тока будет иметь индуктивный характер. Следовательно, величину среза тока можно уменьшить за счет наложения на ток холостого хода трансформатора или электродвигателя емкостной составляющей, т.е. использовать принцип компенсации [58].

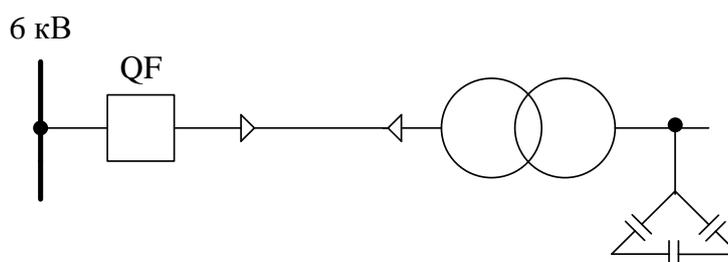
Рассмотрим принцип компенсации тока холостого хода применительно к трансформаторам, т.к. трансформаторы являются основными электроприемниками в сетях 6 кВ шахт и рудников.

Компенсацию тока холостого хода трансформатора можно осуществить на базе устройств компенсации реактивной мощности.

На рисунке 5.8 показаны схемы подключения устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) к обмоткам трансформатора. В первом случае УКРМ подключается к вводу обмоток ВН (рисунок 5.8 а), а во втором случае УКРМ подключается к вводам обмоток НН (рисунок 5.8 б).



а)



б)

Рисунок 5.8 – Возможные схемы подключения устройств компенсации реактивной мощности к обмоткам трансформатора: а) УКРМ подключается к обмотке ВН; б) УКРМ подключается к обмотке НН

На рисунках 5.9 и 5.10 соответственно приведены изменения токов, протекающих в обмотках ВН и НН, в кабельной линии и в УКРМ во времени, а также показаны возникающие срезы токов при отключении трансформаторов от сети в момент времени  $t_1$ .

Анализ временных зависимостей, представленных на рисунках 5.9 и 5.10, показывает, что в случае подключения УКРМ к обмотке ВН емкостной ток будет протекать по кабельной линии и выключателю, что приведет к снижению среза тока в выключателе. Снижение среза тока, протекающего в обмотке, не произойдет, т.к. емкостной ток УКРМ не протекает по обмотке ВН. Это создает условия для возникновения КП в обмотке ВН и как следствие в обмотке НН.

Если УКРМ подключить к обмотке НН, емкостной ток УКРМ будет протекать как по обмотке НН, так и по обмотке ВН, кабельной линии и выключателю, что приведет к снижению среза тока в обмотке ВН и в выключателе. В этом случае можно ожидать снижения величины КП.

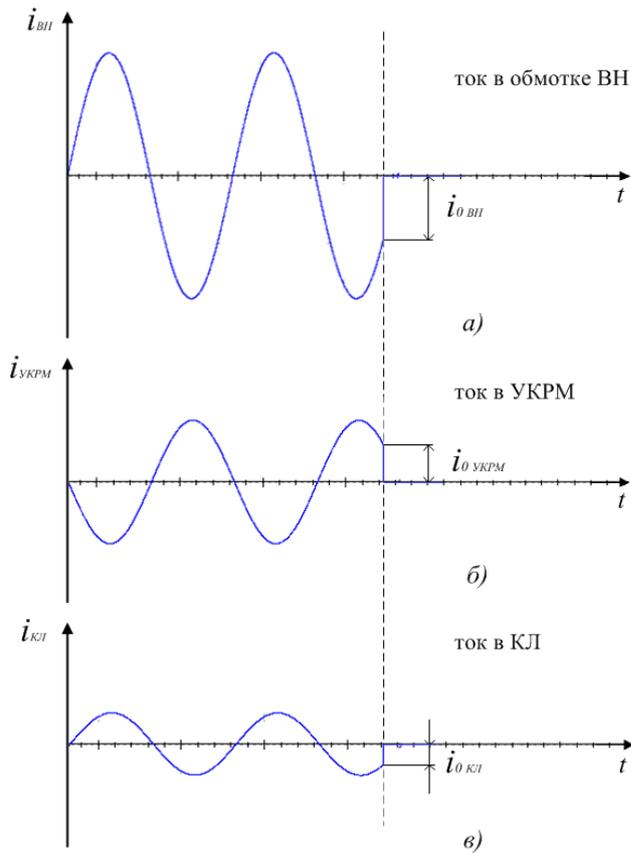


Рисунок 5.9 –Изменения токов во времени, протекающих в обмотке ВН трансформатора, в УКРМ и кабельной линии, если УКРМ подключена к обмотке ВН

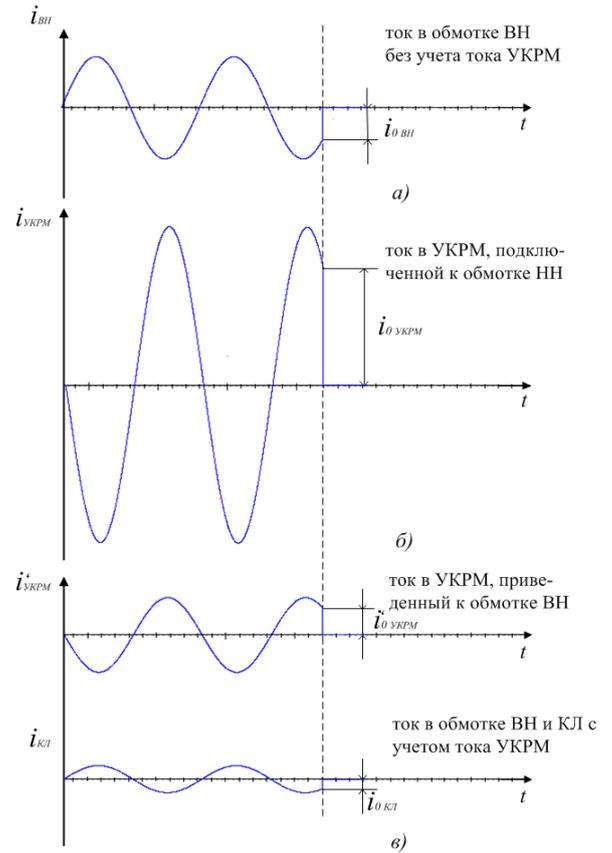


Рисунок 5.10 –Изменения токов во времени, протекающих в обмотке ВН трансформатора, в УКРМ и кабельной линии, если УКРМ подключена к обмотке НН

Для подтверждения выдвинутой гипотезы было выполнено компьютерное моделирование и экспериментальные исследования.

### 5.3.2 Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований

Компьютерное моделирование влияния компенсации тока холостого хода трансформатора на величину КП осуществлялось с помощью схемы моделирования, представленной в третьей главе настоящей диссертации. Моделирование производилось применительно к сухим трансформаторам с литой изоляцией мощностью 250 кВА, 400 кВА, 630 кВА и 1000 кВА.

Изменение кратностей КП, возникающих как в обмотке ВН, так и в обмотке НН трансформатора, оценивалось в зависимости от снижения величины тока холостого хода, вызванное компенсацией.

В результате моделирования были получены зависимости кратностей КП от соотношения  $\frac{I_C}{I_{xx}}$  ( $I_{xx}$  – ток холостого хода в обмотке ВН трансформатора;  $I_C$  – емкостной ток) для каждого из рассмотренных трансформаторов.

Зависимости  $K_{\max} = f\left(\frac{I_C}{I_{xx}}\right)$  представлены на рисунке 5.11.

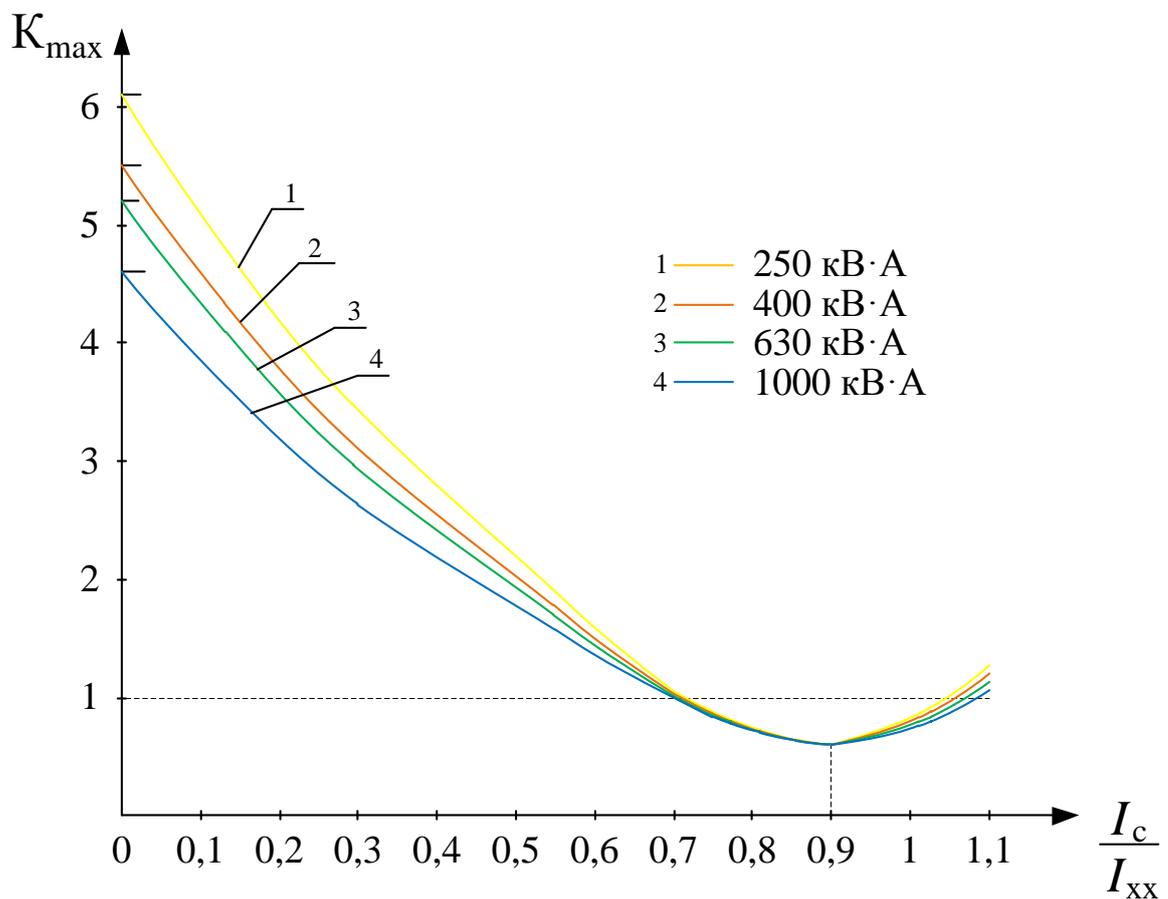


Рисунок 5.11 – Зависимость  $K_{\max} = f\left(\frac{I_C}{I_{xx}}\right)$  для трансформаторов мощностью 250 кВА, 400 кВА, 630 кВА и 1000 кВА

Анализ зависимостей  $K_{\max} = f\left(\frac{I_C}{I_{xx}}\right)$  показывает, что при снижении величины тока холостого хода трансформатора в 3 раза и более  $\left(\frac{I_C}{I_{xx}} \geq 0,7\right)$ , КП в обмотках ВН и НН не возникают.

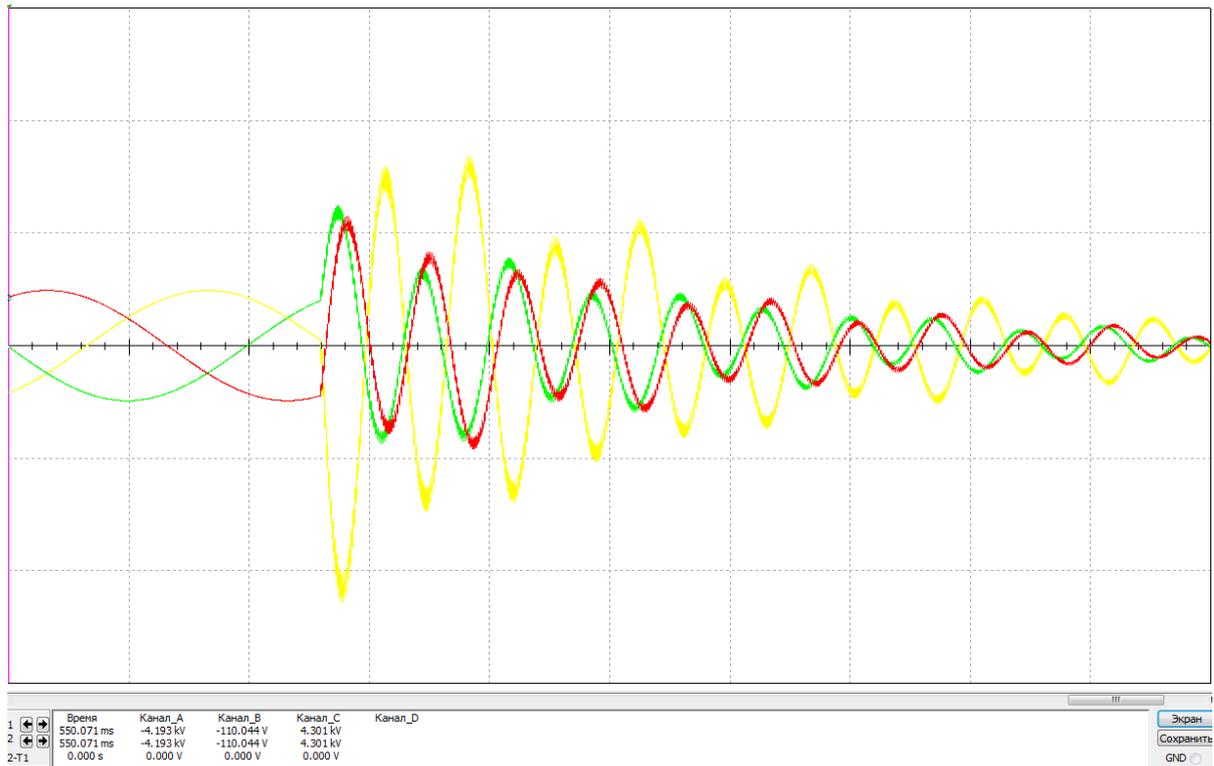
В качестве примера на рисунке 5.12 приведены осциллограммы, полученные при моделировании отключения трансформатора мощностью 250 кВА, когда величина тока холостого хода трансформатора снижена в три раза. Из осциллограмм видно, что КП не возникают, т.к. амплитуда напряжений в фазах А, В и С в переходном режиме соизмерима с амплитудой фазных напряжений до момента коммутации и будет меньше амплитуды линейных напряжений.

Амплитуды колебания фазных напряжений минимальной величины возникают в случае, если отношение  $\frac{I_C}{I_{\max}}$  находится в диапазоне 0,85 – 0,95.

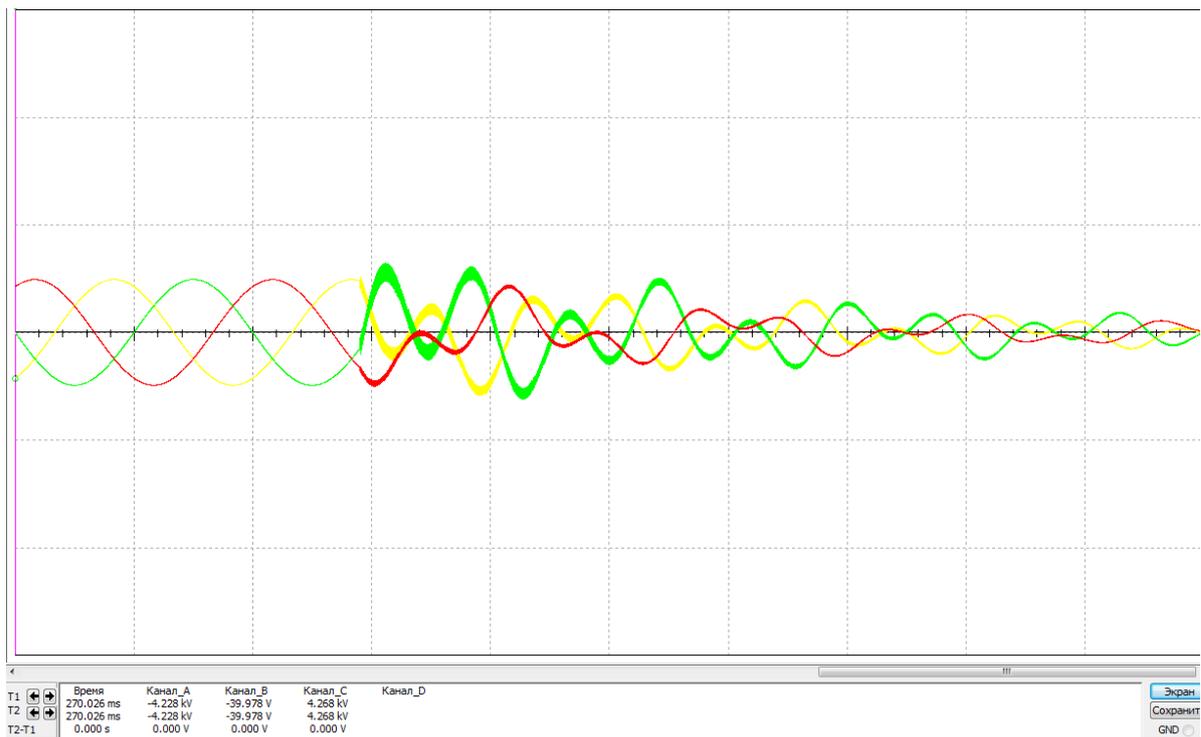
Дальнейшее увеличение емкостного тока приведет к перекомпенсации тока холостого хода трансформатора, что сопровождается ростом величины КП.

Данный эффект иллюстрируется осциллограммами изменения напряжения в обмотке ВН трансформатора, представленными на рисунке 5.13, при условии перекомпенсации тока холостого хода на 30%. В этом случае кратность КП достигает значения 2,4.

Для подтверждения результатов моделирования на реальных объектах были выполнены экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования выполнялись на трансформаторах 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА и 630 кВА.



а)



б)

Рисунок 5.12 – Осциллограммы переходных процессов фазных напряжений в обмотке ВН, возникающих после отключения трансформатора мощностью 250 кВА без и с условием, что величина тока холостого хода снижена в 3 раза: а) ток холостого хода равен паспортному значению; б) ток холостого хода меньше паспортного значения в 3 раза

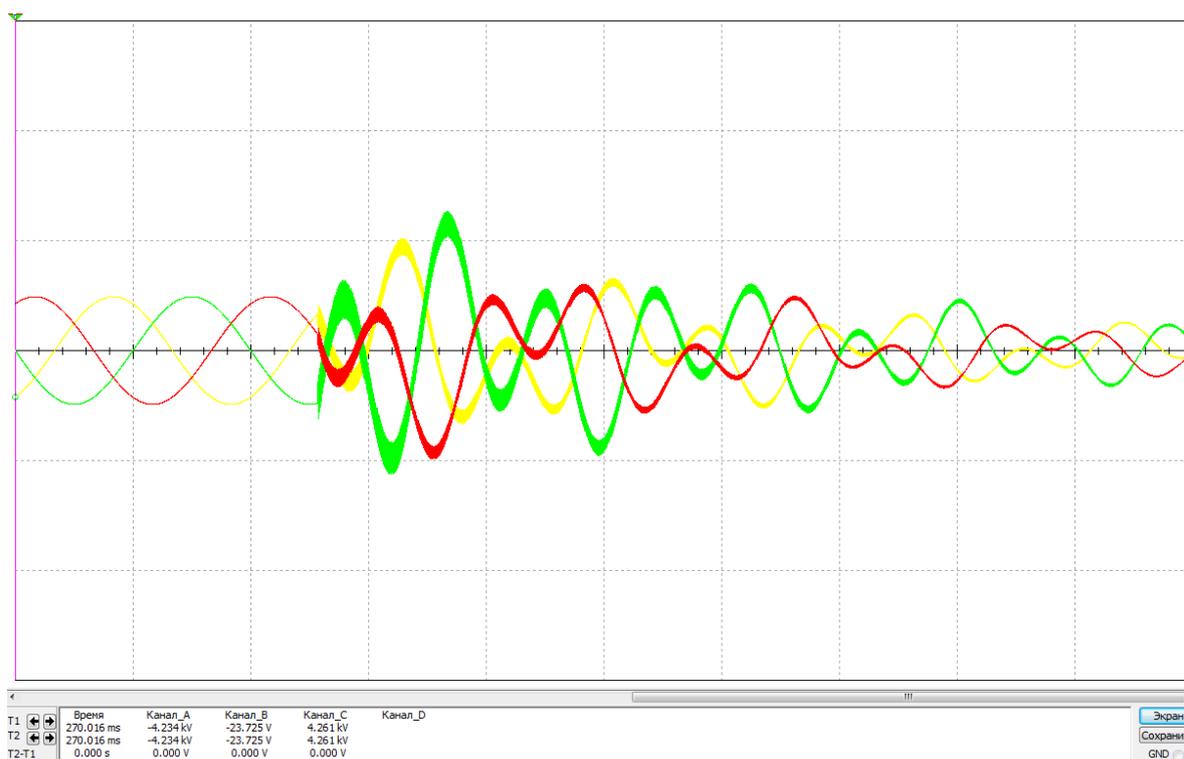


Рисунок 5.13 – осциллограммы переходных процессов фазных напряжений в обмотке ВН, при условии перекомпенсации тока холостого хода на 30%

Схема экспериментальных исследований приведена на рисунке 5.14.

Для измерения тока, протекающего в обмотке ВН и фиксации коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) использовался цифровой прибор комплексного типа ПКК-57 в комплекте с гибкими тороидальными трансформаторами тока. Для измерения и осциллографирования перенапряжений, возникающих в обмотке ВН и НН при коммутации трансформатора вакуумным выключателем, использовался делитель напряжения ДНЕК-10 и осциллограф Tektronix TDS.

В качестве компенсатора тока холостого хода трансформатора использовалась регулируемая конденсаторная установка типа УКМФ-58-04-25-1У3 мощностью 25 кВар с шагом регулирования 1 кВар.

В результате выполнения экспериментальных исследований получена зависимость  $K_{\max} = f(\cos\varphi)$ , которая представлена на рисунке 5.15.

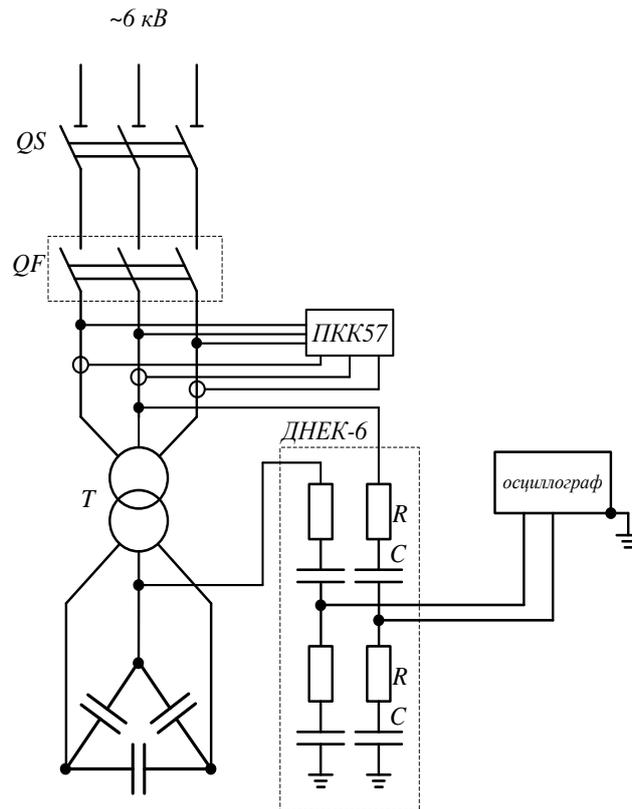


Рисунок 5.14 – Схема измерений КП на обмотке ВН и СН трансформатора 6/0,47 кВ, при использовании регулируемой конденсаторной установки для компенсации реактивной мощности

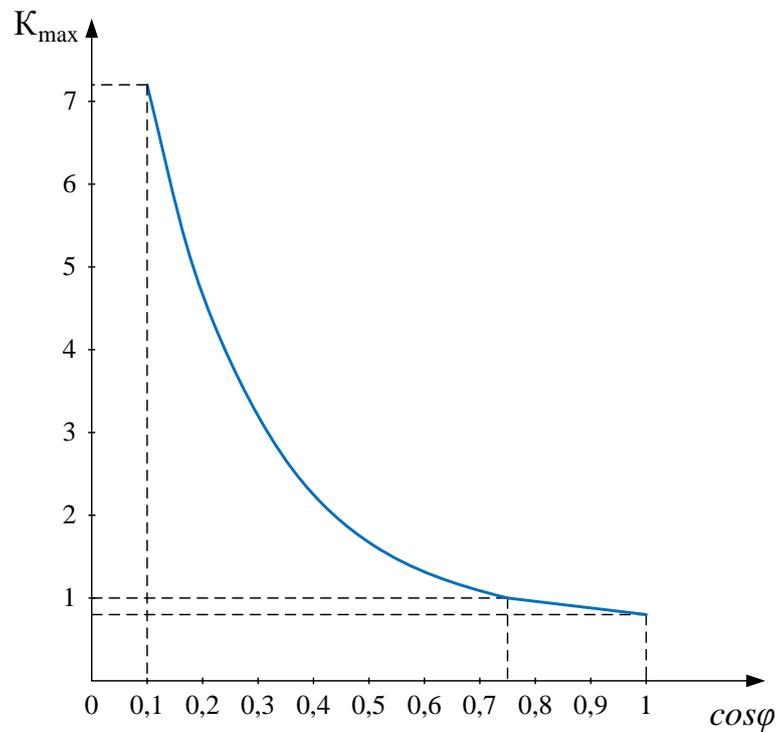


Рисунок 5.15 – Зависимость  $K_{\max} = f(\cos \varphi)$

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

На рисунках 5.16 ÷ 5.19 показаны осциллограммы КП, возникающие при отключении трансформатора мощностью 250 кВА для различных значений  $\cos\varphi$ .

Представленные осциллограммы на рисунках 5.19 (а) и 5.12 (б) подтверждают достоверность результатов компьютерного моделирования, т.к. характер изменения переходных процессов напряжений в обмотках ВН и НН при коммутации реальных трансформаторов и трансформаторов в компьютерной модели практически совпадают.

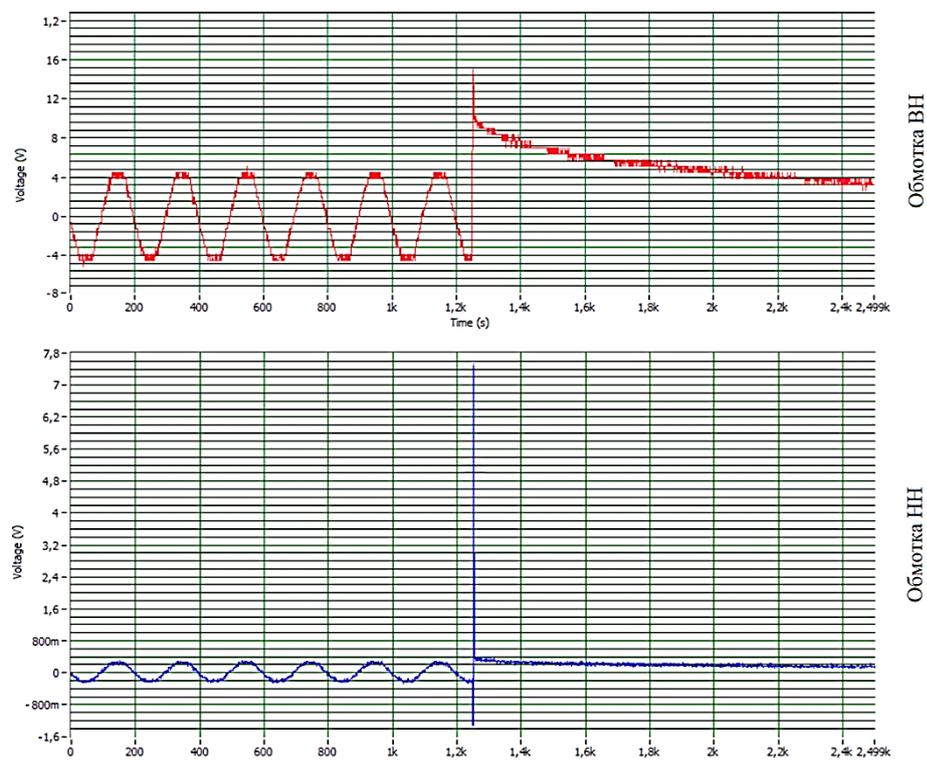


Рисунок 5.16 Осциллограммы КП, возникающие при отключении силового трансформатора мощностью 250кВ·А.  $\cos\varphi=0,3$ ;  $K_{\max\text{ВН}}=4,6$ ;  $K_{\max\text{НН}}=34,7$

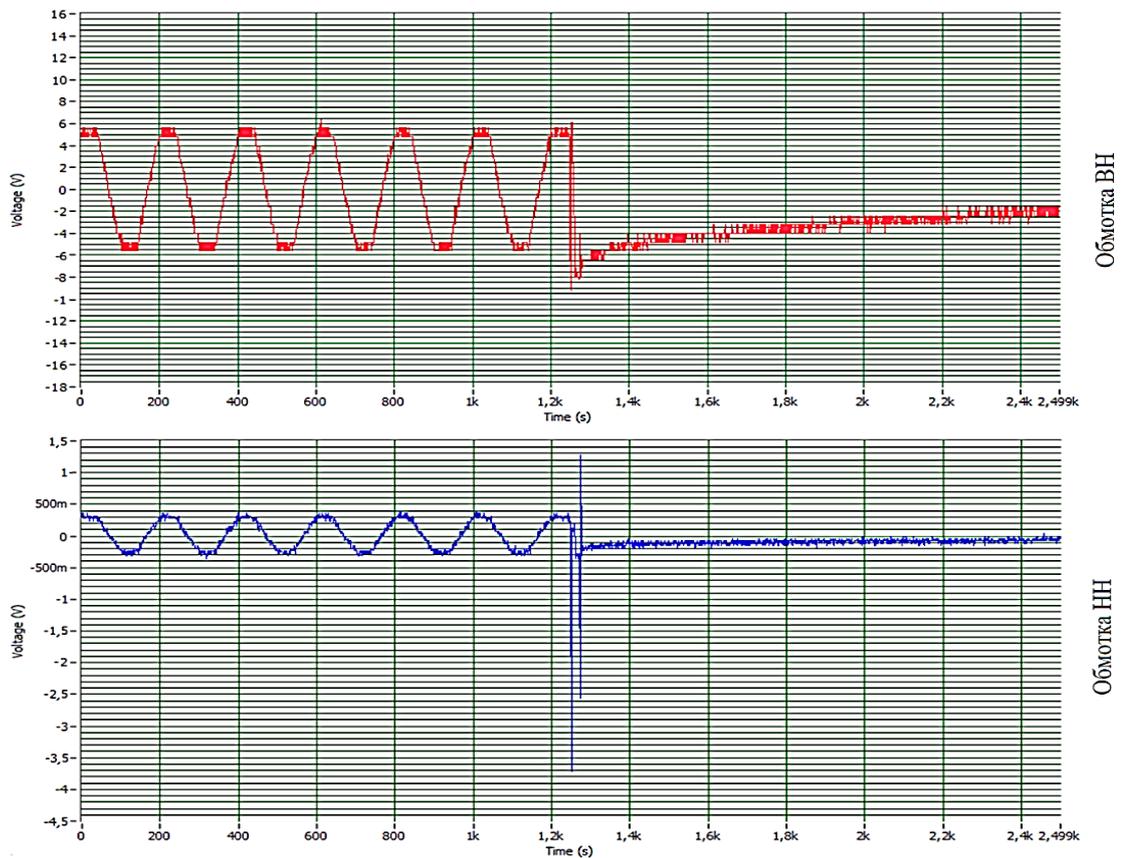


Рисунок 5.17 Осциллограммы КП, возникающие при отключении силового трансформатора мощностью 250кВ·А.  $\cos\varphi=0,5$ ;  $K_{\max\text{ВН}}=2,6$ ;  $K_{\max\text{НН}}=17,0$

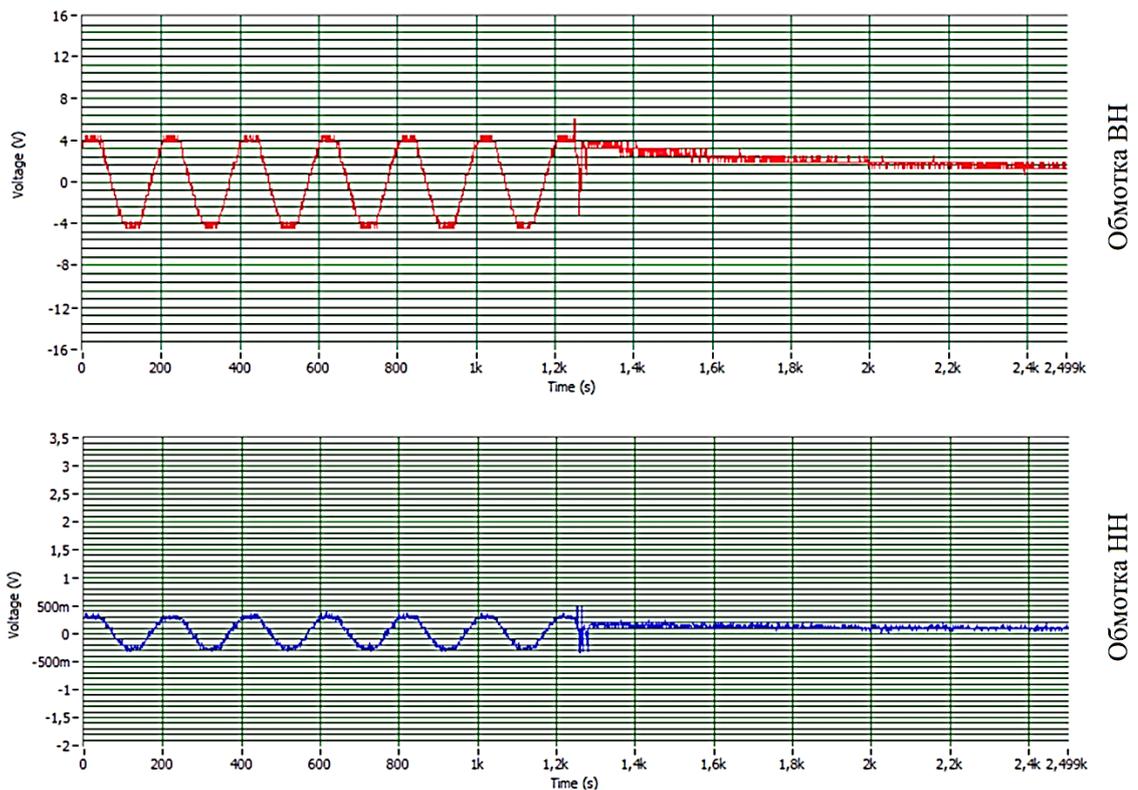


Рисунок 5.18 Осциллограммы КП, возникающие при отключении силового трансформатора мощностью 250кВ·А.  $\cos\varphi=0,75$ ;  $K_{\max\text{ВН}}=1,45$ ;  $K_{\max\text{НН}}=1,5$

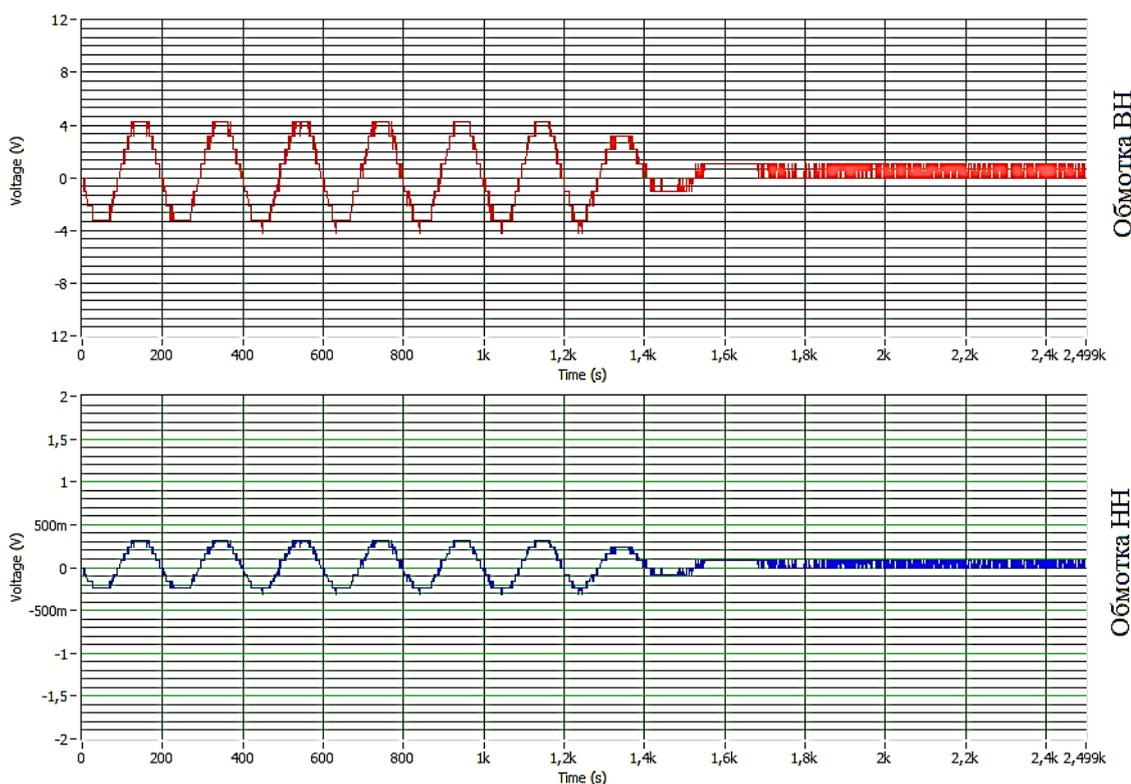


Рисунок 5.19 Осциллограммы КП, возникающие при отключении силового трансформатора мощностью 250кВ·А.  $\cos\varphi=0,92\div 0,96$ ;  $K_{\max\text{ВН}}=0,7$ ;  $K_{\max\text{НН}}=0,75$ .

Это указывает на то, что установки, предназначенные для компенсации реактивной мощности успешно можно использовать и для подавления перенапряжений, возникающих при коммутации силовых трансформаторов, если данные установки будут подключены к обмотке НН трансформатора.

Для этой цели необходимо внести определенные изменения в конструкцию УКРМ.

#### 5.4 Совершенствование установок компенсации реактивной мощности с учетом ограничения коммутационных перенапряжений

В настоящее время для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения 0,4 – 6 кВ используются нерегулируемые, регулируемые и автоматически регулируемые конденсаторные установки, с защитой и без защиты от высших гармоник [37].

Условия эксплуатации современного технологического оборудования шахт и рудников характеризуется резким изменением нагрузки. Использо-

ние частотно-регулируемых электроприводов и тиристорных преобразователей в конструкции технологических машин и комплексов способствует повышению высших гармоник тока в электрических сетях напряжением 0,4 кВ, 0,69 кВ и 1,14 кВ [8,77].

Наличие высших гармоник в сетях способствуют термическому разрушению конденсаторных установок [84], поэтому применительно к условиям шахт и рудников необходимо использовать автоматически регулируемые конденсаторные установки со средствами защиты от высших гармоник.

Для эффективной компенсации реактивной мощности и подавления КП необходимо регулировку конденсаторной установки, подключенной к обмотке НН, осуществлять в зависимости от коэффициента мощности со стороны обмотки ВН трансформатора.

Данным требованиям отвечает принцип автоматической компенсации реактивной мощности, предложенный в работе Скакунова Д.А. [84] и приведен на рисунке 5.20.

Рассмотрим принцип работы указанной системы применительно к шахтным передвижным трансформаторным подстанциям на примере подстанции типа КТСВП 6/0,4 кВ.

Для автоматической регулировки компенсации реактивной мощности используется многоступенчатая конденсаторная установка.

В качестве регулятора выступает специальный датчик  $\cos\varphi$ , который отслеживает текущее значение  $\cos\varphi$  на входе обмотки ВН. Входные сигналы на датчик  $\cos\varphi$  поступают с трансформатора тока (ТТ) и с измерительного трансформатора напряжения типа НОЛ-6,6.

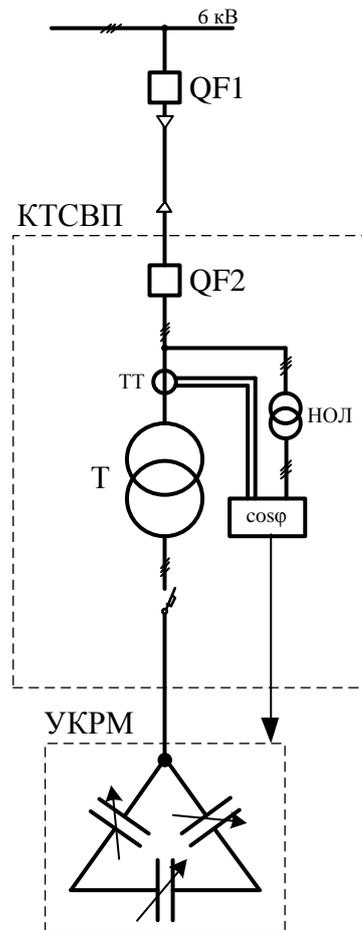


Рисунок 5.20 – Схема автоматического регулирования  $\cos\phi$  на стороне обмотки ВН за счет УКРМ, подключенного к обмотке НН силового трансформатора

Если текущее значение  $\cos\phi$  на вводе обмотки ВН ниже заданного значения датчик воздействует на конденсаторную установку, что приводит к росту емкости установки и, как следствие, к увеличению  $\cos\phi$ . В случае превышения текущего значения  $\cos\phi$  над заданным значением, емкость конденсаторной установки снижается.

Преимуществом данного способа компенсации является компенсация реактивной мощности, потребляемой не только технологическим оборудованием, но и самим трансформатором. В результате этого кабельные линии напряжением 6 кВ шахт и рудников будут обладать максимальной пропускной способностью, т.к. реактивная составляющая тока, протекающего по кабелям, будет минимальной.

Это приведет к существенному снижению потери напряжения в кабельных линиях, что позволит увеличить протяженность подземных выработок без перемещения центральной подземной подстанции.

Опыт эксплуатации конденсаторных установок показывает, что в режиме холостого хода трансформатора емкость конденсаторной установки равна нулю, т.е. компенсация реактивной мощности не происходит, т.к. отсутствует ток нагрузки. В этом случае при отключении трансформатора от сети 6 кВ будут возникать КП.

Для исключения возникновения перенапряжений при коммутации трансформатора в режиме холостого хода необходимо иметь постоянно включенной первую ступень в конденсаторной установке, емкость которой определяется из условия компенсации тока холостого хода трансформатора.

Исследования показали, что КП не возникают в обмотке ВН и НН при отключении трансформатора от сети, если величина тока холостого хода будет меньше паспортного значения в три и более раз. В этом случае коэффициент мощности может находиться в диапазоне 0,7 – 0,8 в зависимости от мощности трансформатора.

Для снижения потери напряжения и повышения пропускной способности кабельных линий напряжением 6 кВ, а также повышения технико-экономических показателей системы электроснабжения 0,4 – 6 кВ необходимо, чтобы  $\cos\varphi$  был не ниже 0,92 [70,40,71]. Следовательно, емкость первой ступени многоступенчатой регулируемой конденсаторной установки должна выбираться из условия, что

$$1 \geq \cos\varphi_{\text{хх}} \geq 0,92, \quad (5.5)$$

где  $\cos\varphi_{\text{хх}}$  – коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода.

На рисунке 5.21 показаны изменения значений емкости постоянно включенной первой ступени регулируемых конденсаторных установок, необходимой для подавления КП в зависимости от параметров трансформаторов, используемых в сетях 6 кВ шахт и рудников.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 5.21, показывает, что величина емкости первой ступени регулируемой конденсаторной установки, позволяющей эффективно ограничивать КП, зависит от напряжения, схемы соединения обмотки НН и мощности трансформатора. С увеличением мощности трансформатора, при неизменном напряжении и схеме обмотки НН, емкость постоянно включенной первой ступени конденсаторной установки возрастает. Увеличение емкости первой ступени также наблюдается, если схемы соединения обмоток изменить со «звезды» на «треугольник». Поэтому при выборе мощности конденсаторной установки, предназначенной не только для компенсации реактивной мощности, но и для подавления КП, для каждого типа трансформатора необходимо учитывать емкость первой постоянно включенной ступени регулирования и возможный диапазон изменения реактивной нагрузки.

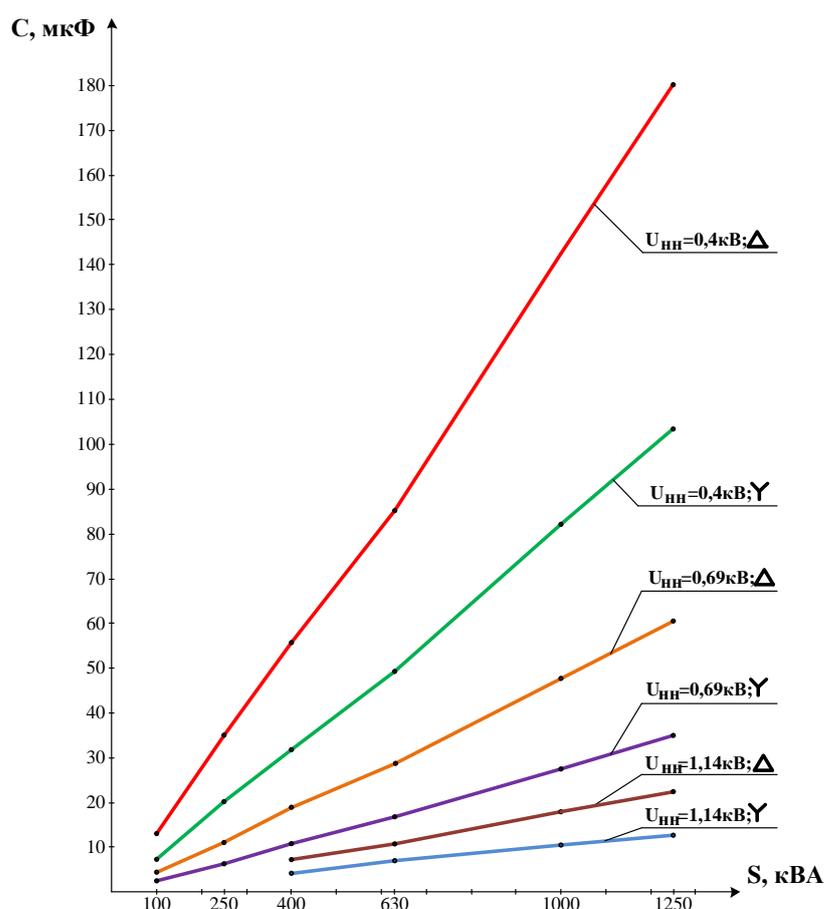


Рисунок 5.21 – Зависимость значений первой ступени конденсаторных установок, необходимых для подавления КП, от схемы соединения обмотки НН и мощности трансформатора

Электрическая схема модернизированной автоматически регулируемой конденсаторной установки приведена на рисунке 5.22.

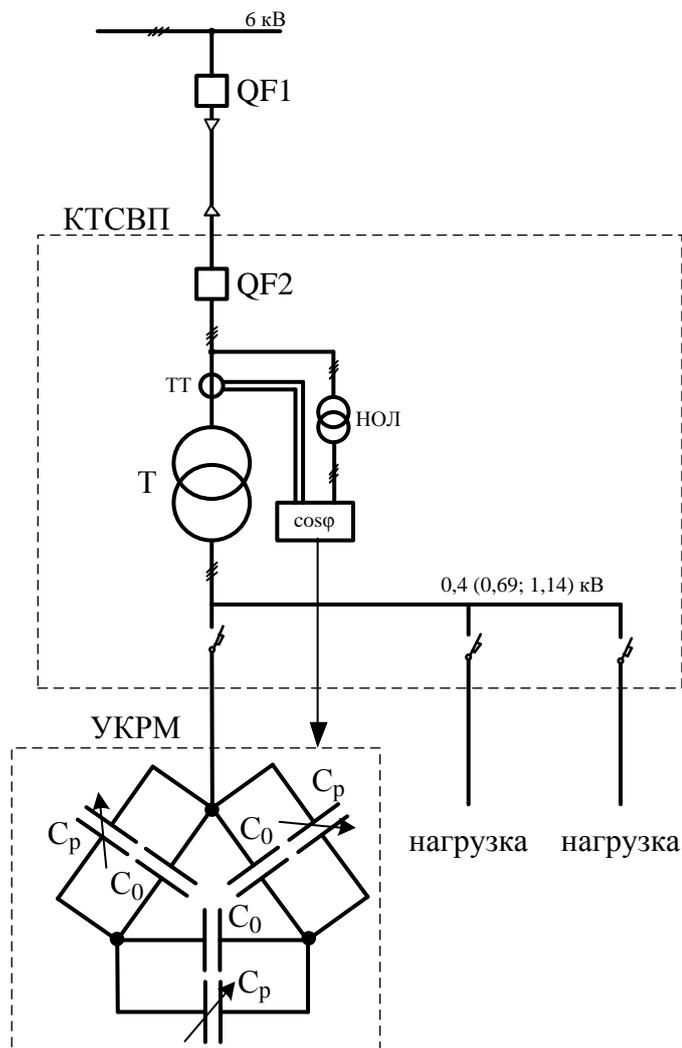


Рисунок 5.22 – Схема модернизированной автоматически регулируемой конденсаторной установки, предназначенной для компенсации реактивной мощности и подавления КП, где  $C_p$  – регулируемая емкость,  $C_0$  – постоянная емкость

### 5.5 Результаты опытной эксплуатации усовершенствованных автоматически регулируемых конденсаторных установок

ООО «Шахтомонтажналадка» в 2009г. выполняла работы по монтажу и наладке устройств по компенсации реактивной мощности в рудничных сетях 6 кВ горно-обогатительного комбината «Нюрбинский» АО «АЛРОСА».

Система компенсации реактивной мощности была выполнена на базе нерегулируемых конденсаторных установок, установленных на ЦПП. Однако, на трех из восьми часто коммутируемых передвижных подстанций 6/0,69

кВ мощностью 630 кВА по рекомендациям автора были установлены усовершенствованные автоматически регулируемые конденсаторные установки напряжением 0,69 кВ мощностью 425 кВар с шагом регулирования 25 кВар, т.е. емкость ступени регулирования составила 56 мкФ, а емкость первой, постоянно включенной ступени составила 16,5 мкФ. Для остальных пяти трансформаторов в качестве защиты от КП использовали ОПНы.

Опыт эксплуатации восьми выбранных трансформаторных подстанций в период с 2009г. по 2011г. показал, что из пяти трансформаторных подстанций, в которых использовались ОПНы, в трех трансформаторных подстанциях наблюдались пробой изоляции разделки кабеля на вводе обмотки ВН. Пробой изоляции в среднем происходил один раз в 3,5 месяца, а на одной трансформаторной подстанции в 2010г. произошел пробой изоляции обмотки НН и только на одной из пяти трансформаторных подстанций наблюдается успешная эксплуатация без аварий.

В тоже время на трех трансформаторных подстанциях, где для компенсации реактивной мощности и защиты от КП использовались усовершенствованные регулируемые конденсаторные установки, аварийных ситуаций, связанных с пробоями изоляции обмоток трансформатора или разделок кабеля не наблюдалось, о чем соответствует акт, представленные ООО «Шахтомонтажналадка» (приложение 2).

Положительный опыт эксплуатации усовершенствованных автоматически регулируемых конденсаторных установок в рудничных сетях 6 кВ Нюрбинского ГОКа подтверждает эффективность ограничения КП, основанный на принципе компенсации реактивной мощности.

Ведущее предприятие России по выпуску конденсаторных установок разного типа и назначения ОАО «СКЗ «КВАР» [35] изучив результаты теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в настоящей диссертации, приняло к внедрению рекомендации по установке дополнительной (первой) ступени регулирования, предназначенной для ограничения КП, в

уже выпускаемой автоматически регулируемой низковольтной установки типа УКМ-0,4 и УКМФ-0,4.

Это позволило расширить функциональные возможности данных установок, что отражено в соответствующем акте внедрения (Приложение 1).

Таким образом, положительный опыт эксплуатации, усовершенствованных устройств по компенсации реактивной мощности, позволяет не только компенсировать реактивную мощность, но и эффективно ограничивать КП, а также использование результатов работы одним из ведущих предприятий России ОАО «СКЗ «КВАР» по выпуску устройств по компенсации реактивной мощности, подтверждает достоверность теоретических и практических результатов настоящей диссертационной работы.

### **ВЫВОДЫ:**

На основе вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. «Зона замирания» в работе ОПН и их низкая термическая устойчивость к режиму ОЗЗ снижает эффективность защиты от КП электродвигателей и трансформаторов, эксплуатируемых в сетях 6 кВ шахт и рудников.

2. Увеличение тока ОЗЗ за счет РС-ограничителей, ограничивает количество их использования в сети 6 кВ шахт и рудников по условиям электробезопасности.

3. Наиболее эффективным устройством защиты от КП высоковольтных электродвигателей шахт и рудников является РС-гаситель, т.к. обеспечивает уровень ограничения не более  $1,8 \cdot U_{н.}$ , что ниже допустимого значения, не влияет на величину тока ОЗЗ и устойчив к воздействию высших гармоник.

4. Эффективную защиту от КП сухих трансформаторов в сети 6 кВ шахт и рудников можно реализовать на базе автоматически регулируемых устройств компенсации реактивной мощности, подключенной к обмотке НН с постоянной включенной первой ступенью, емкость которой выбирается из условия подавления КП.

5. С увеличением коэффициента мощности трансформатора кратность КП снижается. Перенапряжения при коммутации сухих трансформаторов в режиме холостого хода отсутствуют, если коэффициент мощности трансформатора в данном режиме будет не более 0,8.

6. Перекомпенсация тока холостого хода трансформатора приводит к появлению перенапряжений в обмотках ВН и НН.

7. С позиции увеличения пропускной способности системы электропитания 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.

8. Усовершенствованная конструкция существующих автоматически регулируемых устройств компенсации реактивной мощности должны содержать постоянно включенной первую ступень для подавления КП, величина которой выбирается в зависимости от напряжения, схемы обмотки НН и мощности трансформатора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 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, полу-

ченных на основе моделирования и экспериментальным путем практически совпадают (погрешность не превышает 10%), не зависят от коэффициента трансформации, мощности трансформатора и находятся в диапазоне  $10 \div 10,6$ . Это указывает на то, что основная часть энергии, возникающая в обмотке ВН трансформатора после его отключения, передается в обмотку НН за счет емкостных связей, поэтому наиболее рациональной точкой подключения средств защиты от КП является ввода 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, 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, подключенной к обмотке НН с постоянной включенной первой ступенью, емкость которой выбирается из условия подавления КП, основанной 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 РС-гаситель, так как не влияет на величину тока ОЗЗ, устойчив к воздействию высших гармоник и обеспечивает уровень ограничения не более  $1,7 \cdot U_n$ , что ниже допустимого значения.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Абрамович, Б. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6 – 35 кВ [Текст] / Б. Абрамович, С.Кабанов, А. Сергеев, В. Полищук // Новости электротехники. – 2002. - №5. – С.22 - 24.
2. Альбокринов, В.С. Перенапряжения и защита от них в электроустановках нефтяной промышленности [Текст] / В.С. Альбокринов, В.Г. Гольдштейн, Ф.Х. Халилов // - Самара: Самарский университет. – 1997. – 324с.:ил.
3. Аношин, О.А. К вопросу коммутаций индуктивных нагрузок вакуумными выключателями [Текст] / О.А. Аношин // Промышленная энергетика. – 2002. – №7.
4. Базуткин, В.В. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях индуктивных цепей вакуумными выключателями [Текст] / В.В. Базуткин, Г.А. Евдокунин, Ф.Х. Халилов // Электричество. – 1994. - №2.
5. Барышников, Д.В. Экспресс - методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 – 10 кВ промышленных предприятий [Текст] / Д.В. Барышников // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2010.
6. Беккер, Р.Г. Методика сбора и обработки статистической информации о надежности шахтного оборудования [Текст] / Р.Г. Беккер, А.Д. Шипилов, В.Г. Соболев, Г.С. Кузьмин, С.А. Головинова // М.: ИГД им. Скочинского. – 1975. – 96 с.
7. Беляков, Н.Н. исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю [Текст] / Н.Н. Беляков // Электричество. – 1957. - №5. – С. 31 – 36.
8. Бинус, М.С. Новые виды электрооборудования в нормальном рудничном исполнении [Текст] / М.С. Бинус, П.П. Мирошкин // - М.: Недра. – 1987.
9. Брейдо, И.В. Исследование генераторных режимов тиристорного электропривода горных машин [Текст] / И.В. Брейдо, Г.А. Эм // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №3. - С. 25 – 31.

10. Бухтояров, В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров [Текст] / В.Ф. Бухтояров, А.М. Маврицын // – М.: Недра. - 1986. – 184с.:ил.
11. Быстрицкий, Г.Ф. Силовые трансформаторы промышленных предприятий [Текст] / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин // М.: МЭИ. – 2001.
12. Вакуумные дуги: Перевод с английского [Текст] / Под ред. Дж. Лаффети. – М.: Мир. – 1982. – 432с.
13. Васюра, Ю.Ф. Коммутационные перенапряжения при самозапуске высоковольтных электродвигателей [Текст] / Ю.Ф. Васюра, Г.А. Евдокунин // Электротехника. – 1985. № 9.
14. Волотковский, С.А. Электроснабжение угольных шахт [Текст] / С.А. Волотковский, Ю.Т. Разумный, Г.Г. Пивняк // - М.: Недра. – 1984.
15. Гаврилова, Е.В. Влияние типа и мощности электродвигателей и типа выключателей на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горнодобывающих предприятий [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, В.А. Меньшиков, М.В. Коровина // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №3. – С. 6 – 9.
16. Гаврилова, Е.В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 – 10 кВ [Текст] / Е.В. Гаврилова // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2011. – 20 с.
17. Гаврилова Е.В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 – 10 кВ [Текст] / Е.В. Гаврилова // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2011.
18. Галкин В.И. Особенности протекания переходных процессов в мощных ленточных конвейерах с криволинейной в плане трассой [Текст] / В.И. Галкин, Е.С. Сазанкова // Горное оборудование и электромеханика. – 2001. - №6. - С. 7 – 11.

19. Гандулин, Ф.А. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ [Текст] / Ф.А. Гандулин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов // – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 192 с.
20. Герасимов, А.И. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А.И. Герасимов, С.В. Кузьмин // Учебное пособие. – Красноярск: ГУЦМиЗ. – 2006. – 264с.
21. Герман – Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С.Г. Герман – Галкин // - СПб.: Корона – Век. – 2008. – 368 с.
22. Голубев, В.А. Вакуумные выключатели в электрических сетях открытых горных разработок [Текст] / В.А. Голубев, В.А. Котлярчук // - М.: Недра. – 1975.
23. Гончаров, А.Ф. Анализ результатов измерения перенапряжений при коммутации высоковольтных двигателей экскаваторов [Текст] / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн, Ю.Н. Попов // Электротехника. - 1986. - №9. - С.13 – 16.
24. Гончаров, А.Ф. Выбор защитных емкостей для высоковольтных двигателей экскаваторов с учётом тока однофазного замыкания на землю [Текст] / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн // Изв. вузов. – Горный журнал. – 1986. – № 11.
25. Гончаров, А.Ф. Трёхфазный резистивно-емкостной ограничитель перенапряжений [Текст] / А.Ф. Гончаров, С.В. Кузьмин, В.Г. Тарнопольский и др. // Информационно-аналитический сборник. – Красноярск: Красноярск-энергонадзор. – 2001. – №3.
26. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
27. Джуварлы, Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сетях с изолированной нейтралью [Текст] / Ч.М. Джуварлы // Электричество. - 1953. - №6. – С.18 – 27.

28. Дикий, Ю.А. Замыкания на землю в шахтных распределительных сетях [Текст] / Ю.А. Дикий, А.П. Ковалев // Горные машины и автоматика. – 1975. - №8. – С. 39-41.
29. Дробкин, Б.З. Высокодинамичные энергоэффективные электроприводы горных машин [Текст] / Б.З. Дробкин, А.П. Емельянов, А.Е. Козярук, А.О. Свириденко // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - № 4. - С. 34 – 39.
30. Евдокунин, Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения [Текст] / Г.А. Евдокунин, Г. Тиллер // – С.-Петербург: Издательство Сизова М.П.. – 2002. – 147 с.
31. Иванов - Смоленский, А.В. Электрические машины: Учебник для вузов [Текст] / А.В. Иванов – Смоленский // - М.: Энергия. - 1980. – 928 с., ил.
32. Инструкция по проектированию электроустановок угольных шахт, разрезов, обогатительных и брикетных фабрик [Текст] // - М.: - 1993.
33. Каталог «Защитные аппараты. Ограничители перенапряжений» [Текст] // - Великие Луки: ЗАО «Завод электрического оборудования». – 2000. – 32с.
34. Каталог ОПН типа ОПН/TEL [Текст] // - М.: РК «Таврида Электрик». – 2007. – 8с.
35. Каталог продукции ОАО «Серпуховский конденсаторный завод «КВАР» [Текст] // - Серпухов. – 2009. – 45 с.
36. Каталог «Энергия холдинг» [Текст] // - Новокузнецк. – 2009. – 79 с.
37. Ковалев, И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей [Текст] / И.Н. Ковалев // - М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 200 с.
38. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам [Текст] / Ю.В. Корицкий // - Л.: Энергоатомиздат. – 1988. – 728с.
39. Котлярчук, В.А. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутации сетевых двигателей экскаваторов вакуумными выключате-

лями. Отчет о НИР (промежут.) [Текст] / КИЦМ; Руководитель В. А. Котлярчук. – Красноярск, 1975. – 85 с.: ил.

40. Кочкин, В. Реактивная мощность в электрических сетях. Технологии управления компенсацией [Текст] / В. Кочкин // Новости электротехники. – 2007. - №3 (45).

41. Круликовский, Ч. Зависимость режимов работы вакуумных выключателей от свойств вакуумной дуги, последуговых явлений, вакуумной изоляции и параметров коммутируемой цепи. Возможности использования вакуума в электрических сетях [Текст] / Ч. Круликовский // Обзор материалов 17 Научного симпозиума «Электрические разряды и электрическая изоляция в вакууме». – Познань. – 1980. – 29 с.

42. Кудрявцев, А. Исследование аварийности в сетях 6 – 10 кВ горно-металлургических предприятий [Текст] / А. Кудрявцев // Новости электротехники. – 2010. - №5 (60).

43. Кузнецов, Н.Д. Перенапряжения при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями [Текст] / Н.Д. Кузнецов, И.Л. Дегтярев // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции // – Новосибирск. – 2002. – С.142 – 146.

44. Кузьмин, Р.С. Совершенствование методов и средств снижения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6-35 кВ промышленных предприятий [Текст] / Р.С. Кузьмин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2006. – 24 с.

45. Кузьмин, Р.С. Совершенствование методов и средств снижения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6-35 кВ промышленных предприятий [Текст] / Р.С. Кузьмин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2006.

46. Кузьмин, С.В. Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10кВ угольных разрезов [Текст] / С.В. Кузьмин, А.И. Кожин // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Труды вто-

рой Всероссийской научно-технической конференции // – Новосибирск. – 2002. – С.283 – 287.

47. Кузьмин, С.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6 - 10 кВ горнодобывающих предприятий [Текст] / С.В. Кузьмин, Е.В. Гаврилова, Д.В. Барышников // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. - №2. – С. 41 – 44.

48. Кузьмин, С.В. Сравнительный анализ высоковольтных коммутационных аппаратов с точки зрения коммутационных перенапряжений, возникающих в системах электроснабжения электродвигателей [Текст] / С.В. Кузьмин, Е.В. Гаврилова, В.Н. Язев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С. 280 – 285.

49. Куликовский, В.С. Защита высоковольтных электродвигателей экскаваторов от коммутационных перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями [Текст] / В.С. Куликовский // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2002.

50. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф.А. Лихачёв // - М.: Энергия. – 1971. – 152с.

51. Лихачев, Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3 – 220 кВ [Текст] / Ф.А. Лихачев // - М.: Энергия. -1967. – 30 с.

52. Ляхомский, А.В. Электрификация горного производства [Текст] / А.В. Ляхомский, Л.А. Плащанский, Н.И. Чеботаев, В.И. Щуцкий и др. // Учебник для вузов: В 2 т. / Под ред. Л.А. Пучкова, Г.Г. Пивняка. – М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2007.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. 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.

57. 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.

58. 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.

59. 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.

60. 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.

61. 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.

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

63. Майнагашев, Р.А. Устойчивость силовых трансформаторов 6 - 35 кВ к коммутационным перенапряжениям объектами [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.

64. Меньшиков В.А. Методология исследования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6 (10) кВ и разработка мероприятий и средств по их ограничению [Текст] / В.А. Меньшиков // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2006.

65. Мнухин, А.Г. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений [Текст] / А.Г. Мнухин, Б.И. Коневский // – М.: Недра. – 1987. – 143 с.

66. Мнухин, А.Г. Испытание рудничного электрооборудования на коммутационные перенапряжения [Текст] / А.Г. Мнухин // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы и силовые конденсаторы. – 1976. - №3 (59). – С. 21 – 23.

67. Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности. – Серия 05. Выпуск 4. Безопасность электроустановок и электрооборудования угольных шахт (сборник документов) [Текст] // - М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России. – 2000.

68. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сети 6 - 35 кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции [Текст] // Под ред. К.П. Кадомской и др. – Новосибирск. – 2002. – 200с.

69. Обабков, В.К. Ещё раз о компенсации емкостных токов в сетях 6 – 35 кВ [Текст] / В.К. Обабков // Энергетика. – 2002. - №2. – С. 32 – 36.

70. Овсейчук, В. Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности [Текст] / В. Овсейчук, Г. Трафимов, А. Кац, И. Ванер, Р. Укасов, А.Шимко // Новости электротехники. – 2008. - №4 (52).

71. Овчинников, А. Потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4 – 6 (10) кВ [Текст] / А. Овчинников // Новости электротехники. – 20036. - №1 (19).

72. Половой, И.Ф. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения [Текст] / И.Ф. Половой // 2-е изд., перераб. и доп./ – Л.: Энергоатомиздат. – 1990. – 152 с.: ил.

73. Попов, Ю.Н. Исследование коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей карьерных экскаваторов вакуумным выключателем [Текст] / Ю.Н. Попов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 1986.

74. Правила безопасности в угольных шахтах [Текст] // - Самара: Самарский дом печати. – 1995.

75. Правила устройства электроустановок. Издание 7 [Текст] // - М.: НЦ ЭНАС. 2004.
76. Правила эксплуатации электроустановок потребителей [Текст] // - М.: ЗАО «Энергосервис». – 1997.
77. Плащанский, Л.А. основы электроснабжения горных предприятий [Текст] / Л.А. Плащанский // М.: Издательство МГГУ. – 2005.
78. Разгильдеев, Г.И. Эксплуатация вакуумных выключателей в электрических сетях горных предприятий [Текст] / Г.И. Разгильдеев, В.В. Курехин В.В. // – М.: Недра. – 1988. – 102 с.: ил.
79. Раховский, В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме [Текст] / В.И. Раховский // – М.: Наука. – 1970. – 536.: ил.
80. Рыбкин, В.А. Определение волновых параметров и коммутационных перенапряжений при отключении вакуумным выключателем двигателя 6 кВ [Текст] / В.А. Рыбкин, С.С. Чубрик, В.Н. Помыткин // Промышленная энергетика. – 1977. – №11. – С. 41 – 44.
81. Рывкин, А.М. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой [Текст] / А.М. Рывкин, И.А. Лукацкая, А.Л. Буйков, С.М. Давыдов, В.Д. Ляшенко // Электрические станции. – 1990. – №5. – С.62 – 65.
82. Самойлович, И.С. Защита от перенапряжений мобильных электроустановок карьеров / И.С. Самойлович // – М.: НЕДРА. – 1980.
83. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий [Текст] / В.И. Серов, В.И. Щуцкий, Б.М. Ягудаев // – М.: Наука. – 1985.
84. Скакунов, Д.А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4 - 6 кВ нефтеперерабатывающих предприятий [Текст] / Д.А. Скакунов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2010г.

85. Справочник энергетика угольной шахты. В двух томах. Изд. 2-е. [Текст] / И.Г. Дзюбан, Б.Н. Ширнин, В.М. Ванеев, В.М. Гостищев // - Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд». – 2001.

86. Тилер, Г. Координация, изоляция и надежность сетей среднего напряжения при использовании вакуумной коммутационной техники [Текст] / Г. Тилер, А. Гебекке // Инф. бюллетень "Энергия и Менеджмент". – 2000 г.

87. Филиппов, В.И. Внедрение вакуумных выключателей на экскаваторах [Текст] / В.И. Филиппов // Сборник материалов первой научной конференции по проблемам одноковшовых экскаваторов «Электропривод одноковшовых экскаваторов». – Свердловск. – 1972. – С.294.

88. Филиппов, В.И. Исследования и пути повышения надежности систем распределения электрической энергии на разрезах Канско–Ачинского бассейна [Текст] / В.И. Филиппов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 1972.

89. Цапенко, Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Е.Ф. Цапенко, Л.И. Сычев, П.Н. Кулешов // - М.: Недра. – 1988. – 213 с.: ил.

90. Чернышов, Н.Г. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench [Текст] / Н.Г. Чернышов, Т.И. Чернышова // - Тамбов. – Изд-во ТГТУ. – 2005. – 52 с.

91. Черемушкина М.С. Совершенствование систем электропривода конвейерного транспорта [Текст] / М.С. Черемушкина, А.Е. Козярук // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №4. - С. 23-27.

92. Чистяков, Г.Н. Экспериментальные исследования на синтетической модели импульсных перенапряжений при коммутации вакуумного выключателя [Текст] / Г.Н. Чистяков // Промышленная энергетика. – 2003. – №12.

93. Шабунов, В.А. Разработка схем испытаний выключателей в режиме отключения двигателей высокого напряжения [Текст] / В.А. Шабунов // Электротехн. пром-сть. Сер. аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1984. – вып. 6 (152). - С.12 – 16.

94. Шалин, А. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6-35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты [Текст] / А. Шалин // Новости электротехники. – 2005. - №1 (31).

95. Шкрабец, Ф.П. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях [Текст] / Ф.П. Шкрабец, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник // - Днепропетровск: - НГУ. – 2003.

96. Щуцкий, В.И. Защита от замыканий на землю в сетях приисков перенапряжением 6 кВ [Текст] / В.И. Щуцкий, А.А. Буралков, В.С. Смирнов, С.В. Кузьмин, В.М. Соломенцев // - М.: ЦНИИцветмет экономики и информатики. – 1990. – 52.

97. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок [Текст] / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин // - М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 152 с.: ил.

98. Щуцкий, В.И. Критерии оптимизации режима изолированной нейтрали 6 – 10 кВ горных предприятий [Текст] / В.И. Щуцкий, Б.М. Ягудев, В.В. Назаров // Электричество. – 1984. - №9. – с. 11 – 17.

99. Эпштейн, И.Я. Импульсная прочность изоляции экскаваторных электродвигателей [Текст] / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров, Ю.Н. Попов // Изв. вузов – Горный журнал. – 1987. – №7.

100. Эпштейн, И.Я. Методика оценки влияния коммутационных аппаратов на эксплуатационную надежность изоляции электрооборудования [Текст] / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров // Электротехника. – 1990. - №2. – С. 28 – 32.

101. Эпштейн, И.Я. Перспективы применения вакуумных выключателей в электрических сетях горных предприятий Севера [Текст] / И.Я. Эпштейн // Сборник материалов технической конференции «Проблемы промышленного развития северных районов Красноярского края». - Красноярск. – 1971. – С.125.

102. Эпштейн, И.Я. Применение вакуумных выключателей в электрических сетях 6 кВ угольных разрезов [Текст] / И.Я. Эпштейн // Сборник ма-

териалов технической конференции «Надежность электроснабжения угольных разрезов». – Красноярск. – 1971. – С.133.

103. Юу, К.У. Моделирование на цифровых ЭВМ процесса неявного среза тока в вакуумных выключателях [Текст] / К.У. Юу, Дж. П. Бикфорд // *Elektric power Applications*. – 1979. – №4. – С.125 – 131.

104. Czarnecki, L. Influence of contact material properties on the behavior of vacuum arcs around current zero / L. Czarnecki, M. Lindmayer // *Int. Conf. on Electrical Contact, Electromechanical Components and their Applications*. – July. – 1986. – Nagoya. – Japan. - pp. 807-819.

105. Ding, B. Residual carbon in Cu-Cr contact materials / B. Ding, H. Li, X. Wang, J. Wang // *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufakt. Technol.* - vol. 14. - pp. 386-391. – June. - 1991.

106. Frey, P. Metallurgical aspects of contact materials for vacuum switching devices / P. Frey, N. Klink, R. Michal, K. E. Saeger // *IEEE Trans. Plasma Sci.* - vol. 17. - pp. 734-740. - Oct. – 1989.

107. Gibbs, J.D. Comparison of performance of switching technologies on E CIGRE motor simulation circuit // J.D. Gibbs, D. Koch, Dr. P. Malkin, K.J. Kornick // *IEEE Transaction on Power Delivery*. – Vol.4. - №3. – July, 1989.

108. Gibbs, J.D. Investigations of Prestriking and Current Chopping in Medium Voltage SF<sub>6</sub> Rotating Arc and Vacuum Switchgear / J.D. Gibbs, D. Koch, Dr. P. Malkin, K.J. Kornick // *IEEE Transaction on Power Delivery*. – Vol.4. - №1. – Jan, 1989.

109. Greenwood, A.N. A guide to the application of vacuum circuit breakers / A.N. Greenwood, D.R. Kurtz, J.C Sofianek // *IEEE Transaction on Power Application and Systems*. – Vol.90. - №3. – 1971.

110. Kosmac, J. A Statistical Vacuum Circuit Breaker Model for simulation of Transient Overvoltages / J. Kosmac, P. Zunko // *IEEE Transaction on Power Delivery*. – Vol.10. - №1. – Jan, 1995.

111. Moser, T. Verminderung der Schwei – kraft von lichtbogengesmolzonen CuCr50 fur Vakuumschaltgerate / T. Moser, J. Breme // Metall. – Vol. 44. no. 11. pp. 1042 -1047. Nov. 1990.

112. MultiSim проектирование и моделирование. Для преподавателей [Текст] / Перевод на русский язык: учебный центр № «Центр технологий National Instruments» // - Новосибирск. – НГТУ. – Российский филиал корпорации National Instruments. – 2006. – 113 с.

113. Naya, E. Contact for vakuum interrupter / E. Naya, M. Okumura // U.S. Planet 4 879 321. - Sep. - 1989.

114. Naya, E. Contact material for vacuum interrupter / E. Naya, Y. Nagata, T. Horinchi, M. Okumura, M. Demizu, M. Hirama, S. Asakawa, M.Asakawa // U.S. Planet 4 853 184. - Aug. - 1989.

115. Ozawa, K. Sintered Cu-Cr-Te alloy for the vacuum circuit breaker contact / K. Ozawa, K. Matsumoto, K. Yoshigae, M. Yamazaki, H. Shinohara // Proc. Int. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their applications. - pp. 823 – 830. – Nagoya. – Japan. – July. – 1986.

116. Perkins, J.F. Vacuum switchgear application and with reference to switching protection / J.F. Perkins, D. Bhasavanich // IEEE Transaction on Power Delivery. – Vol.4. - №2. – April, 1989.

117. Roguski, A.T. Experimental investigation of the dielectric recovery strength between the separating contracts of vacuum circuit breakers / A.T. Roguski // IEEE Transaction on Power Delivery. – Vol.4. - №2. – April, 1989.

118. Santilli, V.J. Electrical contacts for vacuum interrupter devices / V.J. Santilli // U.S. Patent 4 743 718. – May. – 1988.

119. Slade, P.G. Vacuum Interrupters: The New Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits / P.G. Slade // IEEE Transaction on Industry Applications. – Vol.33. - №6. - Nov/Dec. – 1997.

120. Swindler, D.L. A Comparison of Vacuum and SF<sub>6</sub> Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits / D.L. Swindler // IEEE Transaction on Industry Applications. – Vol.33. - №6. - Nov/Dec. – 1997.

121. Telander, S.H. Surge limiters for vacuum circuit breaker switchgear / S.H. Telander, M.R. Wilhelm, K.B. Stump // IEEE Transaction on Power Delivery. – Vol.2. - №1. – January, 1987.

122. Yokokura, K. Multiple restriking voltage effect in a vacuum circuit breaker on motor insulation / K. Yokokura, S. Masuda, H. Nishikava // “IEEE Trans. on PAS” Vol PAS-100. – 1981. - №4.

123. Working group paper: Interruption of small inductive currents (chapter 1, 2) [Текст] // Electra. – 1980. - №72. – pp.73 – 103.