

*На правах рукописи*



**Гаврилова Екатерина Владимировна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ,  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ  
КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 – 10КВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

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

Красноярск - 2011

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Кузьмин Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Дулесов Александр Сергеевич

кандидат технических наук, профессор,  
Заслуженный энергетик России  
Кунгс Ян Александрович

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

Защита диссертации состоится «22» июня 2011г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу г.Красноярск, ул.Ленина, 70, ауд.А 204.

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

Автореферат разослан «21» мая 2011г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДМ 212.099.07  
канд. техн. наук, доцент



Т.М. Чупак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На современном этапе развития систем электроснабжения (СЭС) 6 - 10кВ промышленных предприятий широко используются вакуумные и элегазовые выключатели, кабели из сшитого полиэтилена, тиристорные преобразователи и преобразователи частоты. Это приводит к тому, что в распределительных сетях присутствуют высшие гармоники, а при коммутации электродвигателей и трансформаторов вакуумными и элегазовыми выключателями возникают коммутационные перенапряжения (КП), величина которых может превышать номинальное напряжение сети в 5 - 7 раз.

Опыт эксплуатации электрооборудования в сетях 6 - 10кВ показал, что основной объем аварийных отключений связан с пробоями изоляции из-за воздействия КП и естественным старением изоляции. Статистика указывает на то, что около 50% однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6 - 10кВ горно-металлургических предприятий возникает по причине КП.

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, так как снизилось число пробоев изоляции кабельных линий и трансформаторов, однако интенсивность пробоев изоляции обмоток электродвигателей остается весьма высокой.

Это в первую очередь связано с отсутствием комплексной методики оценки и прогнозирования КП в распределительных сетях 6 - 10кВ промышленных предприятий, учитывающей влияние на величину и характер КП не только вакуумных и масляных выключателей, но и элегазовых и электромагнитных выключателей, класс напряжения сети, тип кабельной линии и наличие высших гармоник тока, что не позволяет обоснованно подойти к выбору необходимых средств защиты от КП.

Остается открытым вопрос, связанный с эффективным ограничением КП в распределительных сетях 6 - 10кВ с наличием высших гармоник тока.

Решение указанных задач является актуальным, так как позволит спрогнозировать величину КП в системах электроснабжения 6 - 10кВ в случае замены устаревших коммутационных аппаратов на современные и обоснованно подойти к выбору средств защиты от КП, как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации систем электроснабжения, что положительно отразится на надежности СЭС.

**Целью работы** является разработка комплексного метода оценки и прогнозирования КП в высоковольтной системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» и совершенствование средств защиты от КП в сетях 6 - 10кВ при наличии высших гармоник тока.

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

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

2. Выполнить экспериментальные исследования перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов элегазовыми и электромагнитными выключателями с последующей статистической обработкой данных для выявления основных факторов, определяющих величину и характер КП.

3. Осуществить математическое моделирование КП в системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» для изучения влияния параметров электроприемника, высших гармоник тока и угла коммутаций на кратность КП.

4. Разработать комплексный метод оценки и прогнозирования КП в СЭС 6 - 10кВ на основе совершенствования экспресс - методов, за счет учета влияния электромагнитных и элегазовых выключателей, высших гармоник тока, класса напряжения сети и типа кабельной линии на величину перенапряжений.

5. Усовершенствовать конструкцию РС-гасителей, предназначенных для эффективного ограничения КП в сетях 6 - 10кВ с наличием высших гармоник тока

**Объект исследования:** высоковольтные системы «выключатель – кабельная линия – электродвигатель (трансформатор)», эксплуатируемые в распределительных сетях 6 - 10кВ горно-металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий.

**Предмет исследования:** коммутационные перенапряжения, возникающие в системе напряжением 6 - 10кВ «выключатель – кабельная линия - электроприемник».

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории электрических цепей и электрических измерений, теории систем электроснабжения промышленных предприятий, теории электрических машин, численные методы решения уравнений при моделировании переходных процессов в электрических схемах замещения с помощью программного обеспечения MathCAD, методы математической статистики.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработан комплексный метод оценки и прогнозирования КП в системах электроснабжения 6 – 10 кВ, включающий:

- оценку зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов;

- определение возможных диапазонов частоты коммутационного импульса в зависимости от типа и мощности нагрузки для вакуумных, элегазовых, масляных и электромагнитных выключателей, обеспечивающее обоснованный подход к выбору устройств защиты от КП электродвигателей и трансформаторов;

- установленную зависимость понижающего коэффициента кратности КП от напряжения сети, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и типа изоляции кабельной линии.

2. По результатам математического моделирования установлено для электродвигателей мощностью свыше 1000 кВт существенное влияние на рост кратности КП угла коммутации, а для двигателей менее 1000 кВт и гармонического состава тока.

### **Практическая значимость:**

1. Разработанный комплексный метод оценки и прогнозирования КП позволяет оценить величину КП в любой точке высоковольтной системы: «выключатель – кабель – электроприемник», определить точки с наибольшей кратностью КП и обоснованно выбрать необходимые средства защиты.

2. Разработанный и внедренный РС-гаситель с выносным блоком резисторов обладает устойчивостью к воздействию высших гармоник тока, ограничивает кратность КП в распределительных сетях 6 - 10кВ до уровня 1,75 и менее, и тем самым обеспечивает надежную защиту электродвигателей и трансформаторов от перенапряжений.

3. Для эффективного ограничения КП и снижения вероятности термического разрушения данных устройств определены рациональные области использования ОПН, РС-ограничителей и РС- гасителей.

**Реализация полученных результатов.** Разработанный комплексный метод оценки и прогнозирования КП использовался при расчетах перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов в системах электропитания 6 - 10кВ следующих промышленных предприятий: ОАО «САЗ», ОАО «БрАЗ», ОАО «ИрАЗ», ОАО «АНПЗ ВНК» и ОАО «Уралкалий». Усовершенствованные РС-гасители успешно эксплуатируются на ОАО «НПЗ ВНК», ОАО «САЗ» и ОАО «ИрАЗ». За период работы с 2008г. по 2010г. не было зафиксировано ни одного случая выхода из строя электродвигателя по причине воздействия КП.

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по электротехническим специальностям в ФГАОУ ВПО СФУ ИГДГиГ.

**Обоснованность и достоверность научных положений** подтверждаются совпадением расчетных значений КП на основе комплексного метода оценки и прогнозирования КП и экспериментальных данных, полученных при измерениях в системах электроснабжения 6-10 кВ таких предприятий, как ОАО «САЗ», ОАО «БрАЗ», ОАО «ИрАЗ», ОАО «НПЗ ВНК» и ОАО «Уралкалий»

### **На защиту выносятся:**

1. Полученные закономерности максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов для элегазовых и электромагнитных выключателей, позволяющие оценить кратность КП на вводах электроприемников.

2. Установленные зависимости понижающего коэффициента кратности КП от класса напряжения сети, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и типа кабельной линии, которые позволяют оценить влияние высших гармоник тока и параметров кабелей на величину перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов.

3. Комплексный метод оценки и прогнозирования КП в системе «выключатель – кабельная линия – электроприемник», позволяющий определить точки с максимальной кратностью КП в зависимости от типа коммутационного аппарата, параметров кабелей и электроприемников, частоты коммутационного импульса, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и обоснованно

выбрать необходимые средства защиты, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации данной системы.

4. Конструкцию РС-гасителя, предназначенного для ограничения КП в сетях 6 - 10кВ с наличием высших гармоник тока и рациональные области использования ОПНов, РС-ограничителей и РС-гасителей.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: I Международная научно-практическая конференция «ИНТЕХМЕТ-2008» (г.Санкт-Петербург, 2008 г.); VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г.Красноярск, 2007 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, 2009 г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 10 печатных работ, из которых: 3 статьи в периодическом издании по списку ВАК; 1 статья в периодическом издании; 6 работ в трудах международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 91 наименования. Основной текст диссертационной работы изложен на 147 страницах, проиллюстрирован 32 рисунками и 29 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** выполнен анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10кВ на примере горно-металлургических предприятий и нефтеперерабатывающих заводов. Рассмотрены методы оценки КП и существующие средства и устройства их ограничения. Обобщены результаты исследований КП в распределительных сетях 6 - 10кВ.

Показано, что на современном этапе развития СЭС 6 - 10кВ промышленных предприятий основными факторами, влияющими на аварийность распределительных сетей, является сочетание КП и естественного старения изоляции кабельных линий, обмоток электродвигателей и трансформаторов. На долю КП приходится около 50% однофазных замыканий на землю. Это связано с широким использованием вакуумных и элегазовых выключателей.

Для ограничения КП в настоящее время используются ОПН, РС-ограничители и РС-гасители. Выбор устройств защиты от КП и место их установки без учета параметров защищаемого объекта, типа коммутационного аппарата и кабельной линии, наличие высших гармоник в сетях 6 - 10кВ, частоты коммутационного импульса приводит к низкой эффективности устройств, а в

определенных случаях к их термическому разрушению. Например, использование ОПНов для защиты от КП электродвигателей мощностью 2500 кВт и менее, при их коммутации вакуумным выключателем вызывает появление «зоны замирания» в работе ОПН, то есть на определенном промежутке времени ОПН не реагирует на КП, следовательно, не ограничивает их, что способствует возникновению электрического пробоя изоляции обмоток электродвигателей. Подобный эффект наблюдается если частота коммутационного импульса более 45 кГц.

Использование RC-ограничителей и RC-гасителей со встроенным блоком резисторов в распределительных сетях с наличием высших гармоник тока в определенных случаях приводит к их термическому разрушению. Термическому разрушению подвержены и ОПНЫ в режиме однофазного замыкания на землю.

Необоснованность выбора средств защиты от КП связана с отсутствием достоверного прогнозирования КП в СЭС 6 - 10кВ. Существующие методы оценки и прогнозирования КП, к которым относятся методы математического и физического моделирования, экспериментальные и экспресс - методы оценки КП, не обладают достаточной для практики точностью или трудоемки, если коммутация электроприемников осуществляется элегазовыми или электромагнитными выключателями, а в сети присутствуют высшие гармоники тока. Следовательно, наиболее актуальным направлением повышения эффективности ограничения КП в СЭС 6 - 10кВ промышленных предприятий является совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения КП с учетом влияния высших гармоник, электромагнитных и элегазовых выключателей.

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

Для фиксации и осциллографирования КП использовался компенсационный RC- делитель типа ДНЕК-10 и четырехканальный цифровой осциллограф Tektronix TDS2024B. КП фиксировались как на вводах электроприемника, так и на зажимах выключателя. Это позволило оценить влияние параметров электроприемника, кабельной линии на величину и кратность КП в разных точках системы «выключатель – кабельная линия - электроприемник».

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

На рисунке 1 приведены максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений в зависимости от типа и мощности электродвигателя и типа выключателя: 1 –асинхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 2 – синхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 3 – асинхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем; 4 - синхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем.

На рисунке 2 представлены максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений для масляных и сухих трансформаторов в зависимо-

сти от их мощности и типа выключателя: 1 – сухой трансформатор с элегазовым выключателем; 2- масляный трансформатор с элегазовым выключателем; 3 - сухой трансформатор с электромагнитным выключателем; 4 - масляный трансформатор с электромагнитным выключателем.

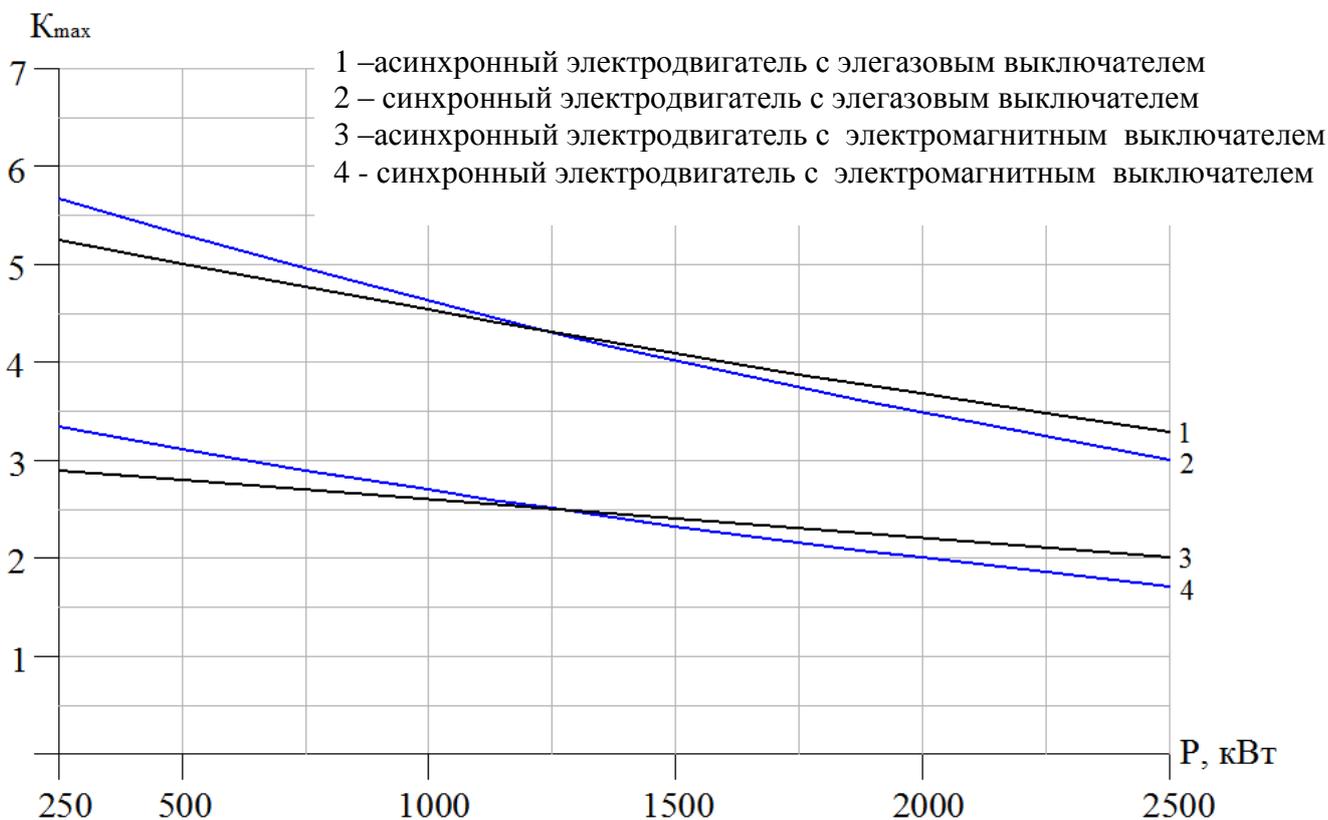


Рисунок 1 - Максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений в зависимости от типа и мощности электродвигателя и типа выключателя

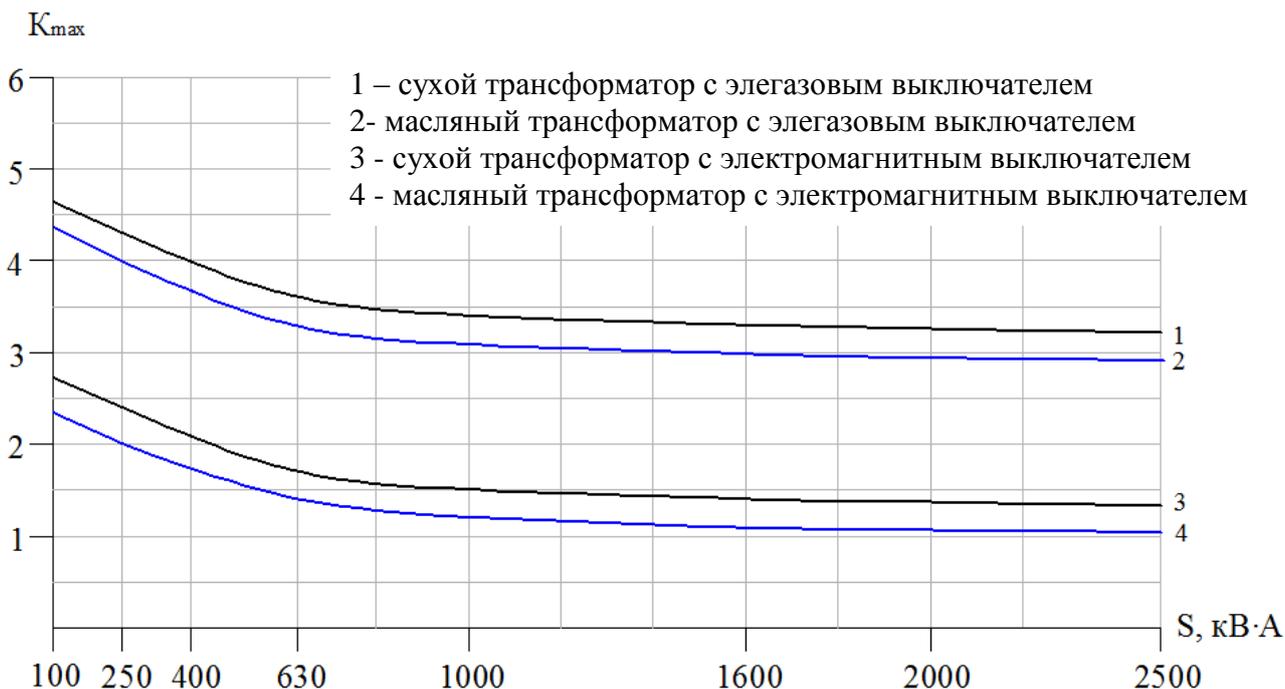


Рисунок 2 – Максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений для масляных и сухих трансформаторов в зависимости от их мощности и типа выключателя

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением мощности электроприемника кратность КП падает, подобные закономерности характерны и для перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов вакуумными и масляными выключателями.

Зависимости, представленные на рисунках 1 и 2, в дальнейшем были использованы при разработке комплексного метода оценки КП в СЭС 6 - 10кВ.

В результате выполнения экспериментальных исследований были получены возможные диапазоны коммутационных импульсов при коммутации асинхронных и синхронных электродвигателей разными типами выключателей, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Диапазон частот коммутационного импульса при коммутации асинхронных и синхронных электродвигателей, разными типами выключателей

Тип выключателя	Мощность электродвигателя, кВт						
	250	320(315)	400	500(520)	630	1250	2500
Электромагнитный	20 - 28	18 - 24	16 - 22	14 - 20	12 - 16	10 - 14	6 - 8
Масляный	30 - 38	28 - 34	24 - 32	20 - 28	18 - 25	12 - 15	7 - 10
Элегазовый	60 - 70	55 - 65	50 - 60	45 - 55	45 - 50	35 - 40	20 - 35
Вакуумный	100 - 120	80 - 100	80 - 90	70 - 80	60 - 80	50 - 70	30 - 42

Ранее доказано, что кабельная линия способствует снижению кратности КП на вводах электроприемника, если частота коммутационного импульса не превышает 45 кГц, поэтому можно утверждать, что для электродвигателей мощностью 250 кВт и более, которые коммутируются вакуумными выключателями, параметры кабельной линии не будут оказывать влияние на величину КП в сторону её уменьшения. Для элегазовых выключателей влияние длины и сечения кабельной линии на параметры КП будет ощущаться для электродвигателей мощностью 1250 кВт и более. При коммутации электродвигателей масляными и электромагнитными выключателями кабельная линия оказывает постоянное влияние на величину и характер КП.

Экспериментально установлено, что при коммутации трансформаторов любым типом выключателей частота коммутационного импульса не превышает 22 кГц. Следовательно, кабельная линия будет оказывать влияние на величину и характер КП на вводах трансформаторов.

Данные диапазоны частот коммутационных импульсов позволяют не только оценить влияние кабельной линии на величину КП, но и обоснованно подойти к выбору устройств защиты от КП, в первую очередь ОПНов, что позволит избежать появления «зоны замиранья» в работе устройства.

Экспериментальные исследования не позволили в полной мере оценить влияние высших гармоник тока на величину и характер КП. Поэтому исследования влияния высших гармоник на величину и характер КП были выполнены с использованием математического моделирования.

**В третьей главе** приведены результаты аналитических исследований перенапряжений при коммутации электроприемников в сетях 6 - 10кВ с наличием высших гармоник тока.

Аналитические исследования производились на базе синхронных двигателей 520 кВт и 1250 кВт, что позволило установить влияние параметров электродвигателей мощностью до и свыше 1000 кВт в сочетании с высшими гармониками тока и углом коммутации на величину и характер КП.

В основу разработки математической модели, описывающей переходные процессы токов и напряжений при отключении электродвигателей от сети 6 кВ, были приняты во внимание следующие факторы, полученные экспериментальным путем:

- длительность коммутационного импульса ничтожно мала по отношению к периоду промышленной частоты и не превышает значения  $5 \cdot 10^{-4}$  с;

- переходные процессы токов и напряжений в обмотках статора электродвигателей обусловлены срезом тока, то есть дуга между контактами выключателя отсутствует.

В этих условиях можно принять следующие допущения: выключатель можно считать идеальным ключом; параметры обмотки электрической машины будут линейны и не зависят от величины тока и напряжения, ротор двигателя в момент коммутации является неподвижным; значение напряжения сети при частоте 50 Гц считаем квазипостоянной величиной равной мгновенному значению напряжения в начальный момент коммутации; междуфазную и межвитковую емкость не учитываем (первой пренебрегаем в виду ее незначительности – 2,5% от емкости фазы на землю, вторая учитывается только для электродвигателей малой мощности).

Это позволяет коммутируемую цепь считать линейной, а влияние высших гармоник оценить с помощью метода суперпозиций.

В результате математического моделирования получены зависимости КП от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и угла коммутации при отключении синхронных электродвигателей от сети 6 кВ. Данные зависимости, представленные на рисунке 3, показывают, что для двигателей мощностью менее 1000 кВт кратность КП возрастает, как с увеличением значения искажения синусоидальности кривой тока, так и угла коммутации. Для двигателей мощностью свыше 1000 кВт основным фактором, влияющим на кратность КП является угол коммутации.

На основе математического моделирования были определены оптимальные значения параметров RC-гасителей, предназначенных для ограничения КП в распределительных сетях 6 - 10кВ при наличии высших гармоник:  $R = 12,5$  Ом,  $C = 0,25$  мкФ. При указанных параметрах RC-гасителей на кратность КП не оказывают влияние высшие гармоники тока и угол коммутации. Это видно из третьей зависимости, представленной на рисунке 3, при этом кратность КП не

превышает значения 1,75, что обеспечивает надежную защиту электродвигателей от КП, так как допустимая кратность КП для изоляции обмоток электродвигателей составляет 1,8.

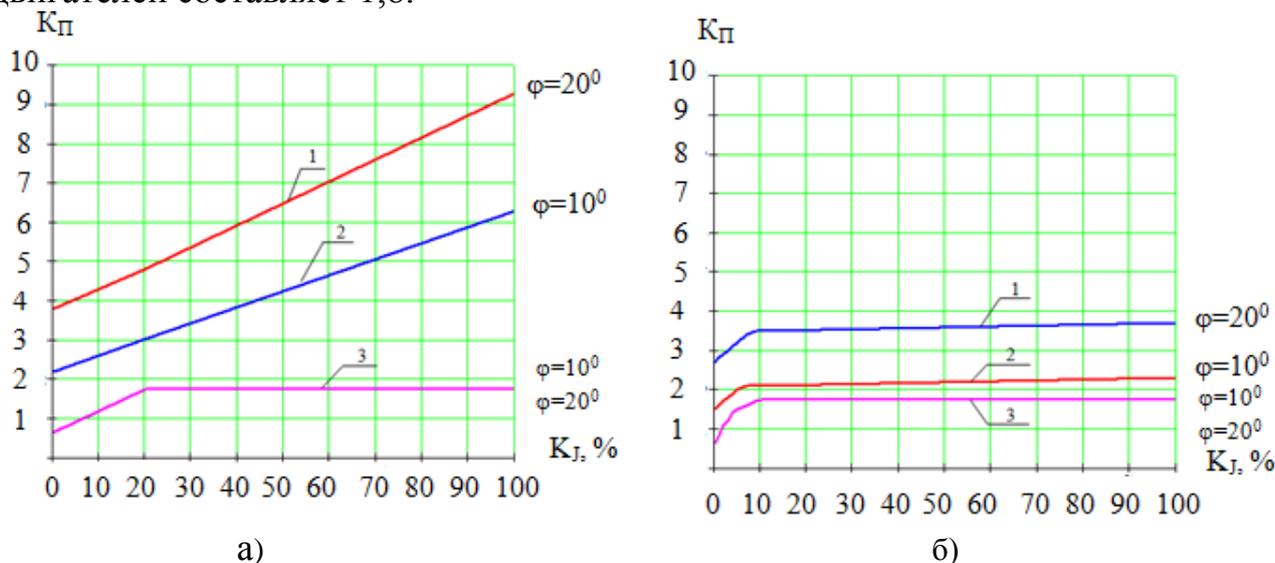


Рисунок 3 – Зависимость кратности коммутационных перенапряжений от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока при отключении синхронного двигателя мощностью 520 кВт (а) и 1250 кВт (б):

1, 2 – без устройств защиты от КП; 3 - с использованием RC-гасителя

Результаты математического моделирования были использованы для определения поправочного коэффициента, учитывающего влияние высших гармоник на кратность КП, при разработке комплексной методики оценки и прогнозирования перенапряжений в СЭС 6 - 10кВ и разработки конструкции RC-гасителей для ограничения КП в сетях с наличием высших гармоник.

**В четвертой главе** приведен комплексный метод оценки и прогнозирования КП в СЭС 6 - 10кВ промышленных предприятий, который базируется на экспресс – методах и позволяет учесть влияние элегазовых и электромагнитных выключателей, а также тип кабельной линии, наличие высших гармоник в сети и напряжение сети. Влияние высших гармоник, длины и сечения кабельной линии и тип её изоляции учитывается с помощью корректирующих коэффициентов. Для сетей напряжением 6 кВ корректирующий коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{к.к.6}} = \frac{1}{k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{вг}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние высших гармоник тока на величину КП и определяется по кривым, представленным на рисунке 4, в зависимости от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока;

$k_{\text{п}}$  – понижающий коэффициент, учитывающий влияние длины и сечения кабельной линии, связывающей выключатель с электроприемником, на величину КП и определяется по кривым, представленным на рисунке 5;

$k_{тип}$  - поправочный коэффициент, учитывающий тип кабельной линии на величину КП и равен 1; 1,4 и 2,6 для кабелей соответственно с бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке (броне); с пластиковой или резиновой изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена.

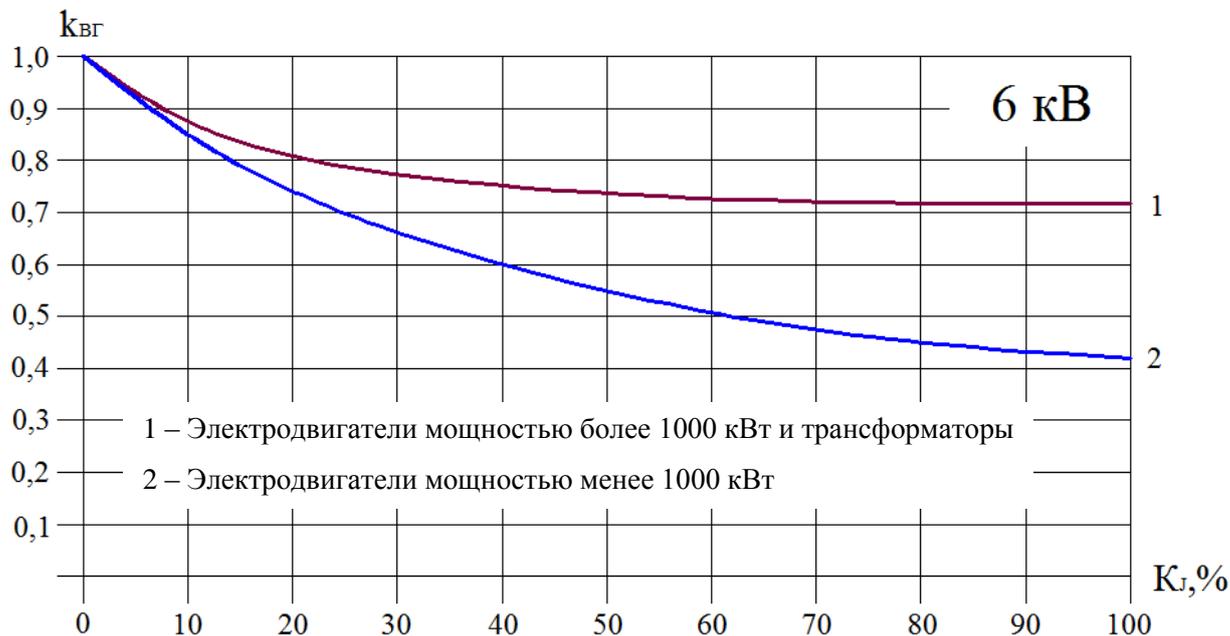
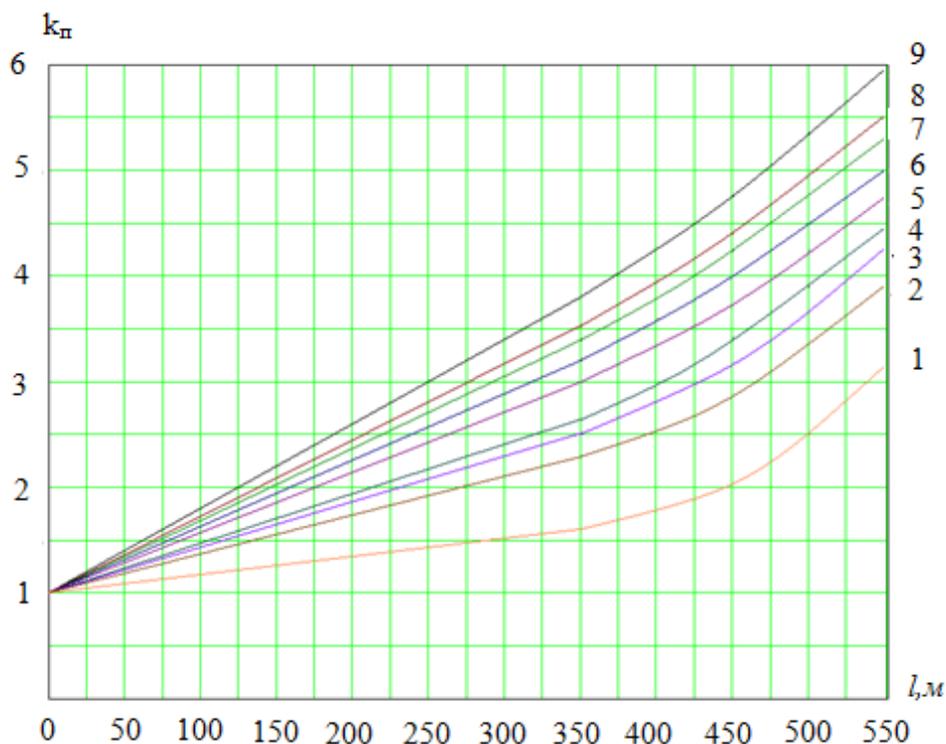


Рисунок 4 - Зависимость поправочного коэффициента кратности коммутационных перенапряжений от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока



1 - 3x25 мм<sup>2</sup>, 2 - 3x35 мм<sup>2</sup>, 3 - 3x50 мм<sup>2</sup>, 4 - 3x70 мм<sup>2</sup>, 5 - 3x95 мм<sup>2</sup>, 6 - 3x120 мм<sup>2</sup>,  
7 - 3x150 мм<sup>2</sup>, 8 - 3x185 мм<sup>2</sup>, 9 - 3x240 мм<sup>2</sup>

Рисунок 5 - Изменение понижающего коэффициента коммутационного перенапряжения в зависимости от длины и сечения кабельной линии

Комплексный метод состоит из трех основных частей.

Первая часть метода позволяет оценить величину перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями. Расчет КП в системе «выключатель – кабельная линия – электроприемник», представленной на рисунке 6, осуществляется в следующей последовательности:



Рисунок 6 - Расчетная схема для определения кратностей коммутационных перенапряжений

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

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

$$K_{п6}^{(2)} = k_{к.к.6} \cdot K_{max}, \quad (3)$$

где  $K_{max}$  – максимальное значение кратности КП на зажимах нагрузки, которое выбирается по кривым, представленным на рисунках 7,8 и 9 в зависимости от типа и мощности электродвигателя или трансформатора, с учетом типа выключателя;

$k_u = 1,45$  и  $1,5$  – соответственно для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и для остальных типов кабелей.

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

$$K_{п6}^{(1)} = \frac{K_{п6}^{(2)}}{k_{II} \cdot k_{тип}}, \quad (4)$$

$$K_{п10}^{(1)} = \frac{K_{п10}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (5)$$

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

$$K_{п.вкл}^{(2)} = \frac{4,2}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (6)$$

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

$$K_{п.вкл}^{(1)} = \frac{K_{п.вкл}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (7)$$

Вторая часть метода посвящена оценки перенапряжений при коммутации электродвигателей мощностью до 1250 кВт и до 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями. Расчет КП осуществляется в следующей последовательности:

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

$$K_{п.6}^{(2)} = \frac{K_{max}}{k_{вг}}, \quad (8)$$

$$K_{п.10}^{(2)} = \frac{k_u \cdot K_{max}}{\sqrt{3} \cdot k_{вг}}, \quad (9)$$

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

$$K_{п6}^{(1)} = \frac{K_{п6}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (10)$$

$$K_{п10}^{(1)} = \frac{K_{п10}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (11)$$

3. Величина КП на зажимах двигателя и выключателя при включении (точка К2 и К1) определяется соответственно по формулам (6) и (7).

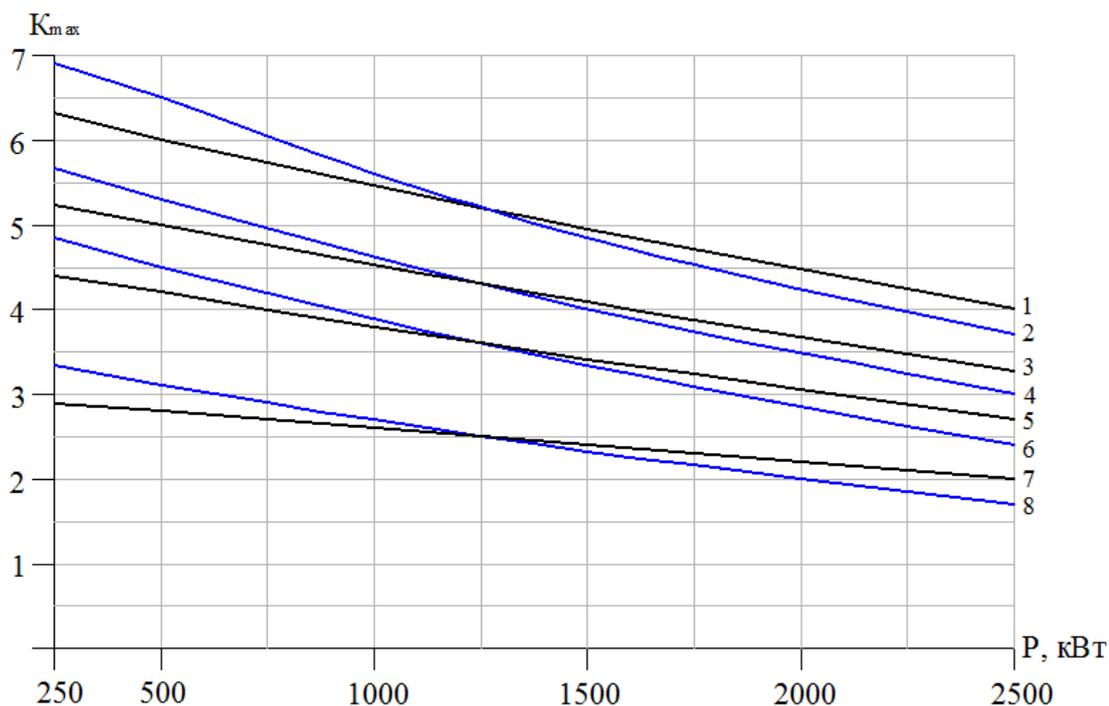


Рисунок 7 – Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для синхронных и асинхронных электродвигателей в зависимости от типа выключателя:

1 - асинхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 2 - синхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 3 – асинхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 4 – синхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 5 – асинхронный электродвигатель с масляным выключателем; 6 – синхронный электродвигатель с масляным выключателем; 7 – асинхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем; 8 - синхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем

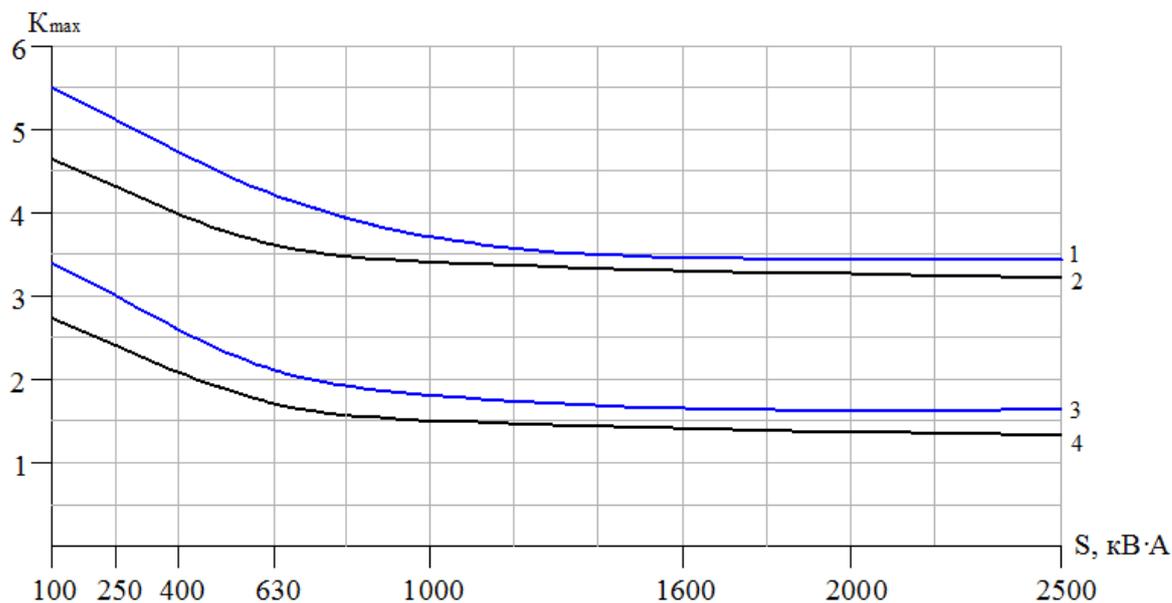


Рисунок 8 - Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для сухих трансформаторов в зависимости от типа выключателя: 1 - вакуумный; 2 – элегазовый; 3 – масляный; 4 – электромагнитный

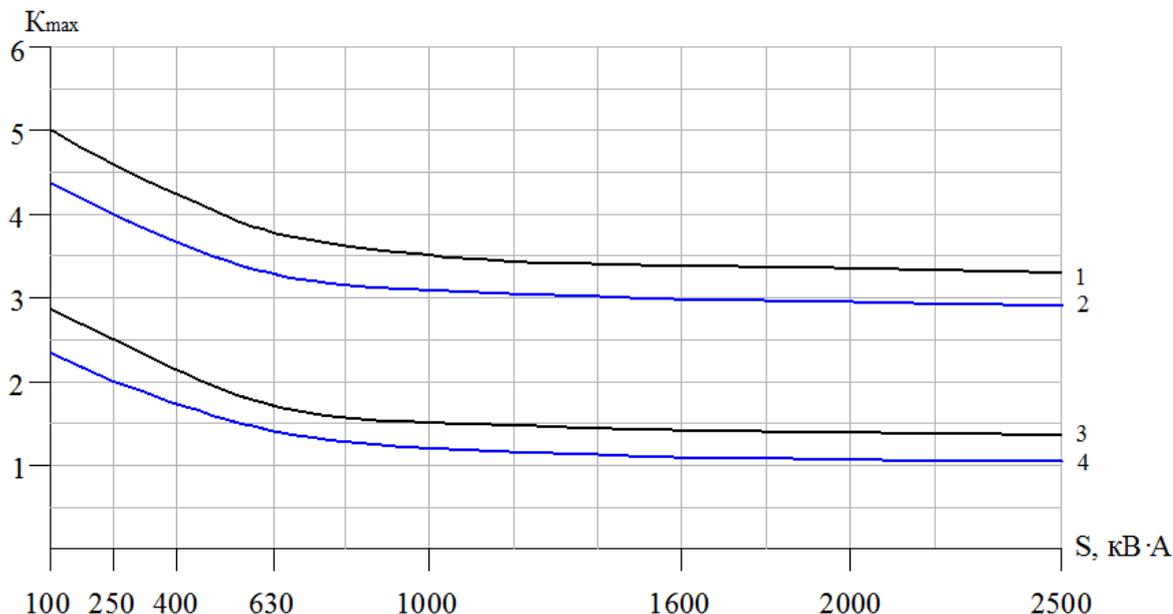


Рисунок 9 - Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для масляных трансформаторов в зависимости от типа выключателя: 1 - вакуумный; 2 – элегазовый; 3 – масляный; 4 – электромагнитный

Отличие первой части от второй состоит в том, что при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями частота коммутационного импульса менее 45 кГц, поэтому в формуле (3) присутствует понижающий коэффициент ( $k_n$ ), учитывающий влияние длины и сечения кабельной линии на кратность КП.

В третьей части метода рассмотрен расчет перенапряжений при коммутации трансформаторов и электродвигателей мощностью более 1250 кВт и 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями. В этом случае частота коммутационного импульса не превышает 45 кГц, поэтому определение величины кратности производится по формулам (3) - (8).

Относительная погрешность предложенного метода оценки и прогнозирования КП по отношению к экспериментальным данным не превышает 10%, поэтому данный метод можно использовать как на стадии проектирования СЭС, так и во время их эксплуатации.

**В пятой главе** выполнен анализ эффективности существующих устройств ограничения КП и определены рациональные области использования ОПН, РС- ограничителей и РС-гасителей.

Показано, что для исключения «зоны замирания» в работе ОПН и повышения термической устойчивости в режиме однофазных замыканий на землю, ограничители перенапряжений нелинейные рационально использовать в сетях 6 - 10кВ с резистивным или комбинированным режимом нейтрали для защиты силовых трансформаторов и кабельных линий от КП.

Обоснованно, что областью использования RC-ограничителей является защита электродвигателей в распределительных сетях 6 - 10кВ промышленных предприятий с токами однофазного замыкания на землю не более 5А, а коэффициент искажения синусоидальности кривой тока не должен превышать 10%.

RC-гасители рациональнее использовать для защита электродвигателей и трансформаторов в сетях с токами однофазного замыкания на землю более 5А и искажением синусоидальности кривой тока не превышающем 10%.

Превышение значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока более 10% может вызвать термическое разрушение RC-ограничителей и RC-гасителей. Это связано с конструкцией данных устройств, в которой блок резисторов и конденсаторов располагается в одном герметичном корпусе, заполненном диэлектрической жидкостью для пропитки конденсаторов, биоразлагающейся в окружающей среде, типа Jarilec C101.

Протекание токов высших гармоник может вызвать интенсивный нагрев резисторов, сопровождающийся повышением давления внутри корпуса, что в конечном счете приводит к разгерметизации устройства и его термическому разрушению. При этом сопротивление резистора составляет 50 Ом, а мощность рассеяния 60 Вт.

Для исключения интенсивного нагрева RC-цепей в герметичном корпусе, предложено блок резисторов вынести наружу, снизить его сопротивление до 12,5 Ом, увеличив мощность рассеяния до 180 Вт, что позволит существенно снизить вероятность термического разрушения RC-гасителей.

Опыт использования RC-гасителей подобной конструкции в распределительных сетях 10 кВ на Саяногорском и Иркутском алюминиевых заводов показал, что за три года эксплуатации ни один электродвигатель не вышел из строя по причине КП, а термическое разрушение RC-гасителей не наблюдалось, при этом значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока изменялось от 24% до 76%.

Внешний вид RC-гасителей данной конструкции представлен на рисунке 10.



Технические характеристики:

Номинальное напряжение сети 6 – 10 кВ

Уровень ограничения КП  $\leq 1,75$

Электрические параметры:

$R = 12,5 \text{ Ом}$

$C = 0,25 \text{ мкФ}$

Габаритные размеры (h×l×b):

700 × 700 × 350 мм

Вес – 28 кг.

Рисунок 10 – Внешний вид RC-гасителя с выносным блоком сопротивлений

Таким образом, использование двух конструкций RC-гасителей позволит расширить область их применения, включая металлургические предприятия.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполненный анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10кВ показал, что в настоящее время основной причиной аварийных отключений в системах электроснабжения промышленных предприятий является совокупность естественного старения изоляции кабельных линий и электрооборудования с КП, поэтому эффективное ограничение КП на основе достоверного прогнозирования КП позволит повысить надежность СЭС промышленных предприятий.

2. При выполнении экспериментальных исследований получены диапазоны частот коммутационных импульсов при использовании вакуумных, элегазовых, масляных и электромагнитных выключателей для коммутации электродвигателей и трансформаторов что позволило эффективно использовать кабельные линии для ограничения КП. Ограничение КП за счет параметров кабельной линии наблюдается, если частота коммутационного импульса менее 45 кГц, что приводит к ограничению перенапряжений на зажимах электродвигателей мощностью 2500 кВт и более при их коммутации вакуумным выключателем. При использовании элегазовых выключателей кабельная линия снижает величину КП на зажимах электродвигателей мощностью 1250 кВт и более. При эксплуатации масляных и электромагнитных выключателей кабельная линия уменьшает перенапряжения при коммутации электродвигателей независимо от их мощности. Кабельная линия снижает перенапряжения при коммутации трансформаторов любыми типами выключателей.

3. По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов, для элегазовых и электромагнитных выключателей, что позволяет оценить кратность КП на вводах электроприемников, при использовании указанных типов выключателей и выбрать необходимые устройства защиты от КП.

4. Результаты математического моделирования показывают, что для двигателей мощностью свыше 1000 кВт существенное влияние на рост кратности КП оказывает угол коммутации, в то время как для двигателей мощностью менее 1000 кВт величина КП зависит как от угла коммутации, так и от наличия высших гармоник, что позволило установить зависимость кратности КП от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока.

5. По результатам математического моделирования и экспериментальных исследований определено, что использование RC-цепей с параметрами:  $C = 0,25$  мкФ и  $R = 12,5$  Ом, позволяет обеспечить надежную защиту электродвигателей от КП при наличии высших гармоник тока в сетях 6 - 10кВ, так как кратность КП не превышает значения 1,75, что ниже допустимого уровня для изоляции обмоток электродвигателей равного 1,8 и практически не зависит от мощности и типа двигателя, коэффициента искажения синусоидальности кри-

вой тока и угла коммутации. Усовершенствованные РС-гасители с данными параметрами и выносным блоком резисторов успешно эксплуатируются в течении трех лет в сетях 10 кВ Саяногорском и Иркутском алюминиевых заводов компании РУСАЛ.

6. Разработан комплексный метод оценки и прогнозирования КП в СЭС 6 - 10кВ, охватывающий все типы высоковольтных коммутационных аппаратов, с учетом влияния напряжения сети, типа кабеля, параметров электродвигателей и трансформаторов и наличия высших гармоник тока.

7. Анализ эффективности устройств защиты от КП на основе использования методов относительных критериев позволил определить рациональные области использования ОПН, РС-ограничителей и РС-гасителей. Рациональная область использования ОПН – защита трансформаторов от КП в распределительных сетях 6 - 10кВ с резистивным и комбинированным режимом нейтрали. РС-ограничители и РС-гасители со встроенным блоком резисторов целесообразно использовать для защиты электродвигателей в сетях 6 - 10кВ с коэффициентом искажения синусоидальности кривой тока не более 10% и токами однофазного замыкания на землю менее и более 5А соответственно. РС-гаситель с выносным блоком резисторов может эксплуатироваться в распределительных сетях независимо от режима нейтрали, величины тока однофазного замыкания на землю и наличия высших гармоник.

## **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В изданиях, рекомендованных ВАК:

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

2. 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.

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

В прочих изданиях:

4. Гаврилова, Е.В. Электромагнитная совместимость средств защиты от коммутационных перенапряжений с защищаемыми объектами [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.Н. Язев, В.И. Суров, В.Е. Дубин, В.А. Меньшиков // Техничко-экономический вестник РУСАЛа. – 2006. - №17 – С. 62 – 64.

5. Гаврилова, Е.В. Анализ аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири и основные направления по снижению аварийности [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, И.С. Зыков // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 22 – 24.

6. Гаврилова, Е.В. Влияние процесса дугогашения выключателя на уровень и характер коммутационных перенапряжений [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С. 322 – 325.

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

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

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

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

Гаврилова Екатерина Владимировна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И  
СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В  
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 - 10КВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 18.05.2011. Заказ №

Формат 60×90/16. Усл.печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии