

На правах рукописи

МИТЮГИН Александр Андреевич

Электромагнитная совместимость сетей 0,4 кВ и технических средств до 10 кВ

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Яковлев Валерий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Фоминич Эдуард Николаевич;

кандидат технических наук, доцент
Колычев Александр Валерьевич.

Ведущая организация - 23 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ПРОЕКТНЫЙ
ИНСТИТУТ филиал открытого акционерного общества 31
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ СПЕЦИАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА

Защита состоится «06» декабря 2012 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт - Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В связи с широким внедрением в эксплуатацию микропроцессорных блоков управления и автоматики на стороне 6 (10) кВ возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) таких технических средств (ТС) с жёсткой электромагнитной обстановкой (ЭМО) в электроэнергетике. Отмечается, что значительная доля случаев (по разным источникам до 90 %), связанных со сбоем в работе или повреждением ТС, была вызвана перенапряжениями в сети питания. В условиях жёсткой ЭМО в электроэнергетике ТС подвергаются воздействию перенапряжений не менее 1 – 2-х раз в неделю, при этом сбои в работе функциональной логики могут происходить уже при трёхкратном перенапряжении. Возникающие перенапряжения (электромагнитные помехи (ЭМП)) имеют весьма разнообразные параметры, что обусловлено наличием большого числа потенциальных источников помех с различными условиями их возникновения. Поэтому для повышения помехоустойчивости ТС целесообразным становится исследование влияния **перенапряжений конкретного вида в условиях реальной ЭМО.**

Импульсные источники питания (ИИП) цепей управления силовыми выключателями на высокой стороне 6(10) кВ подключаются от щита собственных нужд распределительного устройства 0,4 кВ, что способствует прониканию перенапряжений из сети питания к чувствительным электронным элементам на стороне 6 (10) кВ.

Короткие замыкания на стороне 0,4 кВ создают высоковольтные перенапряжения, влияющие на работу импульсных источников питания.

Исследование отключения коротких замыканий требует проведения многократных режимов КЗ в действующей электрической сети, что крайне нежелательно. В настоящее время метод оценки помехоустойчивости ТС на воздействие к реальным коммутационным перенапряжениям, вызванных отключением КЗ, отсутствует. Обеспечить безотказную работу ТС можно, если проводить испытания с параметрами воздействия, соответствующими реальным перенапряжениям. Поэтому для проведения исследований на помехоустойчивость ТС необходима разработка **имитационного оборудования, способного многократно и безаварийно** создавать перенапряжения, соответствующие реальным коммутационным процессам, возникающим в электрической сети 0,4 кВ при отключении КЗ.

Для оценки помехоустойчивости ТС существует нормативная документация, которая ориентируется на «идеализированную» ЭМО. Так, помехоустойчивость микропроцессорных устройств защиты и автоматики от коммутационных импульсных перенапряжений при КЗ проверяется воздействием микросекундных импульсных помех большой энергии с конкретной формой импульса 1/50 мкс. При возникновении тока короткого замыкания современные коммутационные аппараты практически мгновенно отключают аварийный участок сети, и тем самым создают коммутационные перенапряжения. Параметры перенапряжений при отключении КЗ по частоте,

амплитуде и форме импульсов зависят от конкретной электрической сети и могут быть установлены при многократных опытах КЗ с учётом величин «среза» тока и процессов, происходящих на контактах коммутационного аппарата. Поэтому на основе только существующей **нормативной** документации становится **невозможным** обеспечить помехоустойчивость блоков с микропроцессорами на высокой стороне.

На основании изученных параметров перенапряжений можно разрабатывать методы защиты, выбирать элементную базу помехоподавляющих фильтров ТС, разрабатывать оптимальные схемные и проектные решения и, тем самым, существенно продлить срок их службы, оценивать уровень восприимчивости ТС в условиях воздействия перенапряжений, вызванных отключением аварийного режима.

Объектом исследования в данной работе являются технические средства с импульсными источниками питания. **Предметом исследования** является электромагнитная совместимость сетей 0,4 кВ и технических средств до 10 кВ.

При выполнении расчётов коммутационных процессов предполагается, что дуга гаснет в момент прохождения тока через нулевое значение, не учитываются процессы при зажигании электрической дуги. В действительности, коммутационный процесс отключения КЗ создаёт комбинацию помех, возникающих как в момент зажигания электрической дуги, так и в момент её окончательного погасания. Так, при малой электрической ёмкости присоединения преждевременное погасание дуги (иногда при значениях в 20 А), приводит к образованию перенапряжений амплитудой до нескольких киловольт. Поэтому требования и методы испытаний, установленные в стандартах для проверки функционирования ТС, не могут охватывать возникновение всех возможных случаев воздействия перенапряжений при эксплуатации ТС в жёсткой электромагнитной обстановке. Таким образом, безотказное функционирование современных ТС не может быть реализовано лишь при использовании импульсных генераторов, определённых действующими нормативными документами.

На основании вышеизложенного формируется **цель работы**: разработка методов и средств оценки помехоустойчивости технических средств в том числе и на высокой стороне при условии воздействия реальных перенапряжений, вызванных отключением коротких замыканий в системе электроснабжения 0,4 кВ.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются **следующие задачи**:

- оценка известных методов определения перенапряжений на коммутационном аппарате при отключении КЗ;
- анализ физических процессов на контактах коммутационных аппаратов при размыкании электрического тока;
- разработка упрощенной методики для расчёта перенапряжений при отключении КЗ;

- анализ возникновения перенапряжений на стороне 6 (10) кВ силового трансформатора при отключении КЗ на стороне 0,4 кВ;
- разработка методики в среде SIMULINK для исследования перенапряжений с учётом процессов в контактном промежутке;
- исследование перенапряжений при отключении КЗ в действующих сетях;
- разработка и создание установки, предназначенной для имитации и исследования перенапряжений при отключении КЗ в электрических сетях;
- исследование влияния перенапряжений при отключении КЗ на импульсные источники питания;
- разработка рекомендаций по снижению перенапряжений при отключении КЗ в электрических сетях.

При решении поставленных задач использовались следующие методы научного исследования: компьютерное моделирование переходных процессов в среде SIMULINK математического пакета MatLab, расчёт в программе MathCAD, создание имитационной установки для проведения исследований, обработка экспериментальных данных.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, и **основные положения, выносимые на защиту.**

1. Выполнен анализ существующих методов исследования и регистрации перенапряжений на коммутационном аппарате при отключении КЗ.
2. Разработана упрощенная модель электрической сети для исследования перенапряжений при отключении КЗ с различными начальными данными.
3. Выполнен анализ различных путей перехода перенапряжений при отключении аварийного режима на стороне 0,4 кВ на сторону 6 (10) кВ.
4. Разработана установка для имитации переходных процессов, соответствующим перенапряжениям в электрической сети при отключении КЗ.
5. Предложен новый метод испытаний современных импульсных источников питания в условиях воздействия перенапряжений, вызванных отключением аварийных режимов в системе электроснабжения.
6. Получены новые экспериментальные данные, благодаря которым выявлено отличие энергии импульсных напряжений во вторичном напряжении импульсных источников питания при воздействии на них как регламентированного импульса, так и импульсов из сети при отключении КЗ.
7. Экспериментально установлено значение тока «среза» при отключении КЗ, и предложен способ обоснования появления перенапряжений на основе параметров размыкаемых контуров.
8. Установлена причинная связь известного «взрыва» мостика из жидкого металла между контактами коммутационного аппарата при их начальном разведении с перенапряжением, возникающим на коммутационном аппарате при образовании электрической дуги.
9. Получена эмпирическая формула для описания перенапряжения при образовании дуги.

10. Показано, что перенапряжения, вызванные отключением КЗ, отличаются различным спектральным составом при возникновении и в конце переходного процесса.

11. Разработаны рекомендации по уменьшению амплитуд перенапряжений.

Прикладная ценность полученных результатов. На основании проведенных исследований разработана установка для имитации переходных процессов, которые возникают в электрической сети при отключении КЗ. Разработанная имитационная установка в настоящее время применяется в Филиале ОАО «26 ЦНИИ» при оценке помехоустойчивости технических средств, в частности при выполнении НИР "Привод – 11". Выполненные исследования выявили основные параметры перенапряжений.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. XXXIX Неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно – практической конференции 6-11 декабря 2010 года, г. Санкт - Петербург.

2. Международная молодёжная научно-техническая конференция «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ» 21 - 25 ноября 2011 года, г. Самара.

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь работ, из них одна работа в издании, рекомендованном ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа выполнена на 173 страницах основного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, 115 рисунков, 27 таблиц, списка использованных источников, который содержит 115 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, предмет, цель, задачи и методы исследования, раскрыты научная новизна и практическая ценность результатов исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена рассмотрению физических процессов на контактах коммутационных аппаратов при их разведении. Выделены два наиболее существенных перенапряжения - а именно при зажигании электрической дуги между контактами коммутационного аппарата и после её погасания. Показано, что характер этих перенапряжений определяется различными условиями их возникновения. Перенапряжение при зажигании электрической дуги между контактами коммутационного аппарата определяется "взрывной" электронной эмиссией. Перенапряжение после погасания дуги определяется параметрами электрической сети. Обосновано, что для анализа перенапряжений при зажигании дуги необходимо выполнять экспериментальные исследования, а для анализа перенапряжений после погасания дуги возможно производить расчёты переходных процессов характерных для конкретных электрических схем.

Выполнен анализ существующих методов исследования напряжения на

коммутационном аппарате при отключении КЗ.

Отмечены следующие недостатки существующих методов, касающихся: оценки параметров моделируемой сети, необходимости снятия напряжения и отключения всех электроприемников, невозможности проведения многократных опытов КЗ в действующей сети, рассмотрения коммутационных процессов между контактами.

Сделан вывод о необходимости разработки имитационного оборудования, способного многократно и безаварийно для системы электроснабжения воспроизводить перенапряжения, характерные для отключения КЗ в различных системах электроснабжения.

Рассмотрены случаи перехода перенапряжений в системе 6 (10) / 0,4 кВ со стороны одного класса напряжения на сторону другого класса.

Приняты основные допущения для расчета отключения коротких замыканий в электрических сетях.

Во второй главе представлена методика расчёта перенапряжений при отключении КЗ с различными начальными данными. Рассмотрены процессы отключения КЗ и возникновения перенапряжений с обрывом тока при значениях, отличных от нулевых значений. Электрическая схема для выполнения приведена на рисунке 1.

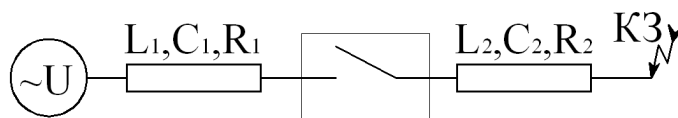


Рисунок 1 - Электрическая схема для расчета перенапряжений при отключении КЗ

где:

$L_1; C_1; R_1$ - параметры электрической сети до коммутационного аппарата,
 $L_2; C_2; R_2$ - параметры сети после коммутационного аппарата.

Выполненный расчет показал, что основными причинами возникновения перенапряжений являются: значения индуктивностей как L_1 , так и L_2 отключаемых участков сети, уменьшение суммарной ёмкости как всей системы в целом C_1 , так и соответственно ёмкости C_2 отключаемого участка, значение тока «среза». Перенапряжение при отключении КЗ имеет резко отличающийся частотный спектр, что обусловлено наличием двух контуров, разделяемых коммутационным аппаратом. Перенапряжения для рассматриваемых случаев имеют высокочастотный характер. Показано, что при токе «среза» в 20 А в электрической сети возникают перенапряжения более 4,0 кВ. Такое значение перенапряжений значительно превосходит значение, при котором происходит нарушение работы функциональной логики.

Выполнен различными способами теоретический анализ перехода перенапряжений со стороны 0,4 кВ на сторону 6 (10) кВ. Показано, что приоритетным путем передачи перенапряжений при отключении КЗ является электрическая передача.

В третьей главе приводятся результаты моделирования перенапряжений при отключении КЗ с использованием компьютерного пакета SIMULINK. Изучено протекание переходных процессов, характерных для различных электрических сетей при отключении токов КЗ, с учетом нелинейных параметров электрической дуги между контактами. В частности, рассмотрено возникновение перенапряжений в сетях с различным соединением вторичных обмоток силовых трансформаторов ("звезда – звезда с нулем" и "треугольник – зигзаг с нулем"), различными значениями тока погасания дуги (1 А и 20 А), различной емкостью, сосредоточенной на шинах трансформаторной подстанции.

Исследование перенапряжений при отключении КЗ путем подключения блока нелинейного ограничителя перенапряжений показало, что амплитуда перенапряжений при этом уменьшается до допустимых пределов. За допустимый предел принято значение менее 0,66 кВ, не приводящее к сбою в работе системной логики микропроцессорного устройства.

Изучены схемные мероприятия для ограничения амплитуд перенапряжений:

- до коммутационного аппарата, путем использования силового трансформатора с соединением обмоток "треугольник – зигзаг с нулем".
- за коммутационным аппаратом, путем установки на отходящие линии от распределительного щита емкости величиной 30нФ.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям перенапряжений при отключении КЗ в **действующей** электрической сети и исследованиям перенапряжений, получаемых с помощью разработанной и сконструированной имитационной установки.

Для исследования перенапряжений в электрической сети разработана схема регистрации перенапряжений, которая приведена на рисунке 2. На рисунке 3 показан общий вид экспериментального стенда действующей электрической сети.

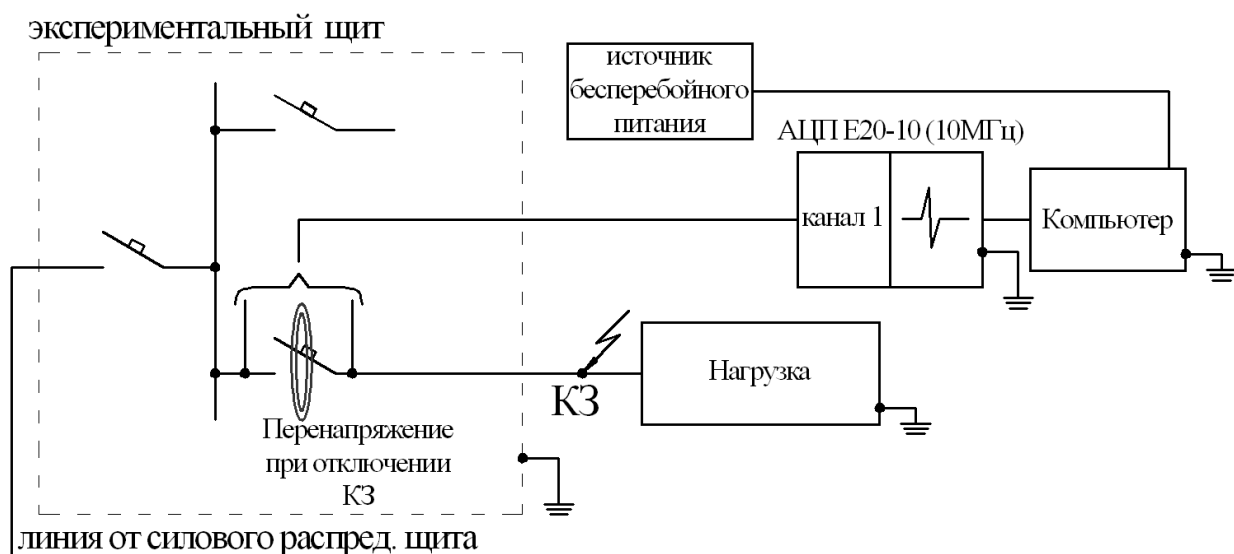


Рисунок 2 - Схема регистрации перенапряжений в действующей электрической сети при отключении КЗ



Рисунок 3 - Экспериментальный стенд для регистрации перенапряжений в действующей электрической сети

На рисунке 3: 1 – экспериментальный щит; 2 – силовой распределительный щит; 3 – регистратор переходных процессов; 4 – ПК.

На рисунке 4 показана характерная осциллограмма перенапряжения на коммутационном аппарате при отключении короткого замыкания в электрической сети.

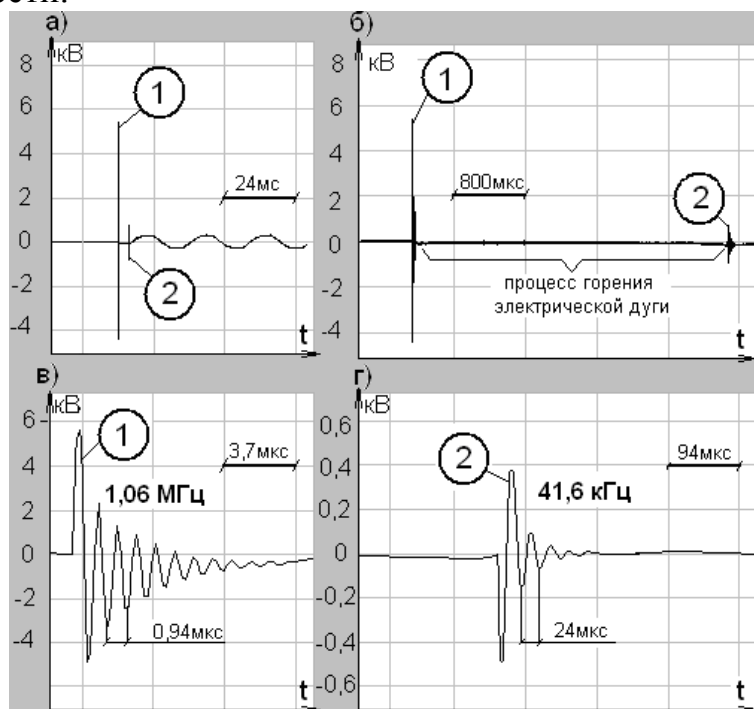


Рисунок 4 - Осциллограммы перенапряжений при отключении КЗ:

а) регистрация импульсов перенапряжения на коммутационном аппарате (масштаб 24мс); б) тот же процесс (масштаб времени 800 мкс/деление); в) перенапряжение при образовании дуги (масштаб времени 3,7 мкс/деление); г) перенапряжение при погасании дуги (масштаб времени 94мкс/деление).

Сделан вывод о том, что основная часть перенапряжений возникает в начальный момент разведения контактов при зажигании дуги и в момент ее погасания.

Принципиальная схема и фото изготовленной имитационной установки представлены на рисунке 5.

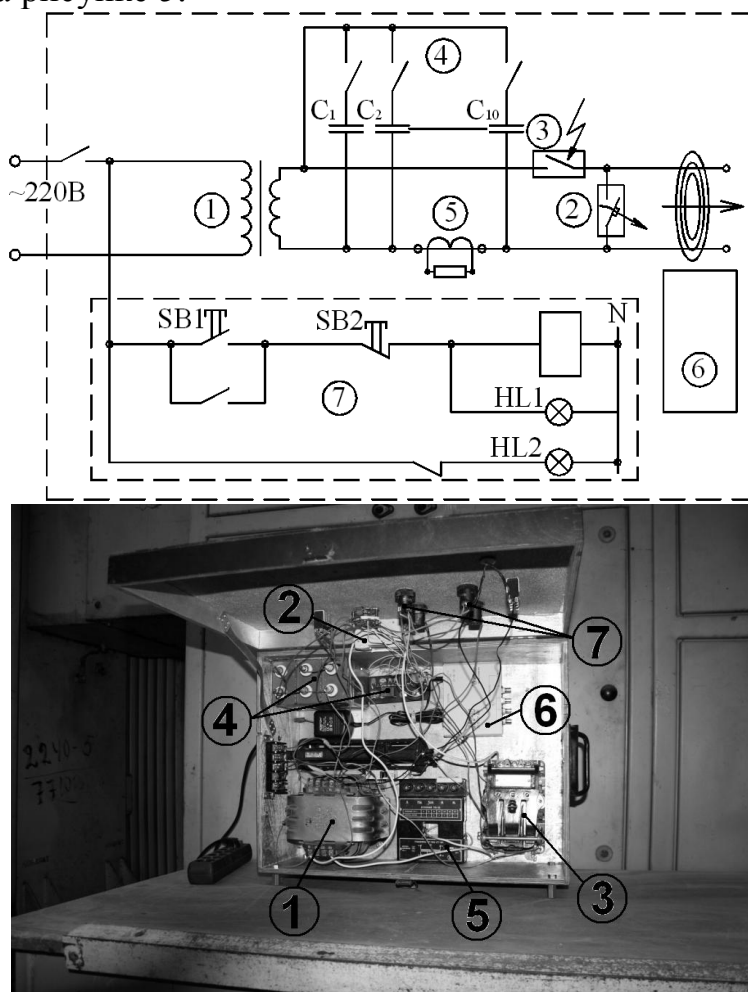


Рисунок 5 - Принципиальная схема и фото имитационной установки

На рисунке 5 цифрами показаны следующие элементы: 1 – разделительный трансформатор; 2 – коммутационный аппарат для отключения КЗ; 3 – магнитный пускатель; 4 – магазин емкостей с переключателем; 5 – трансформатор тока; 6 – модуль быстродействующего аналого-цифрового преобразования (АЦП L-Card E20-10); 7 – блок подготовки выполнения КЗ.

Короткое замыкание за разделительным трансформатором (1) создается с помощью управляемого магнитного пускателя (3), отключение производится коммутационным аппаратом (характеристика С6А). При выполнении отключения возникают переходные процессы, характерные для режима отключения КЗ в электрической сети.

На рисунке 6 показана характерная осциллограмма перенапряжения на имитационной установке.

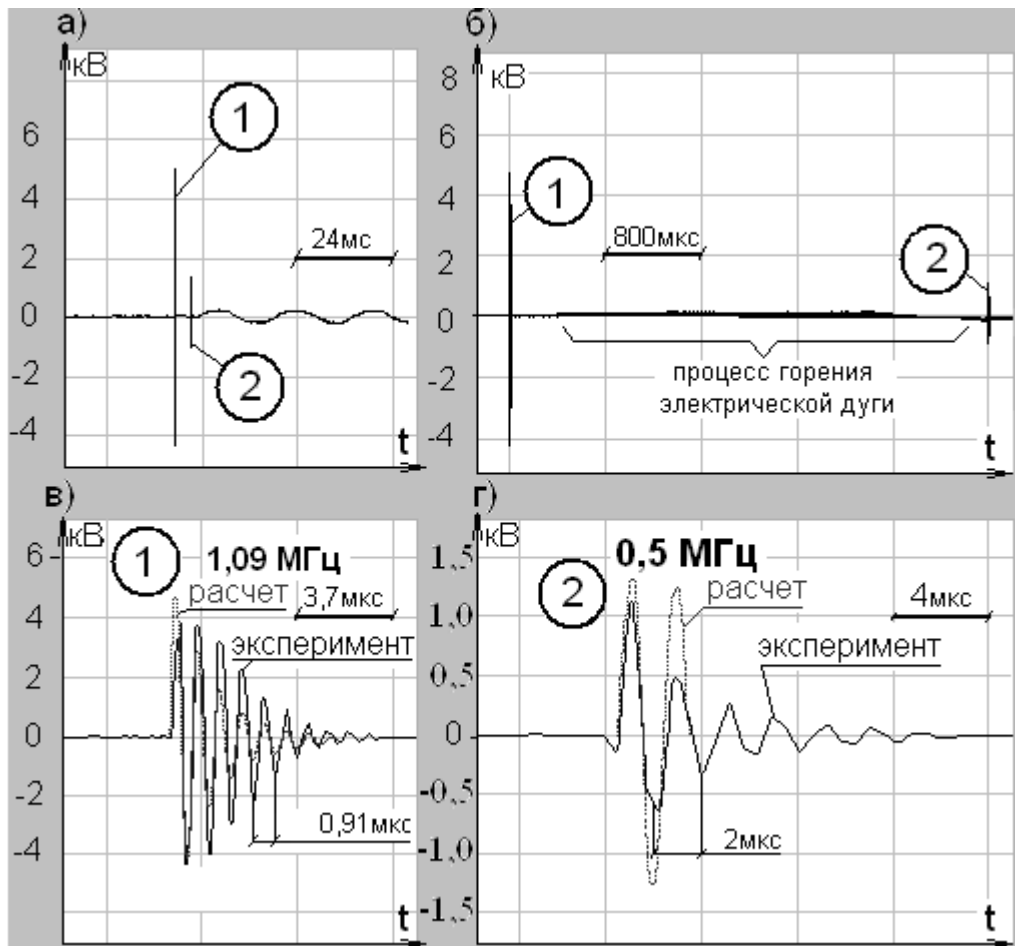


Рисунок 6 - Осциллограммы перенапряжений на имитационной установке: а) регистрация импульсов перенапряжения на коммутационном аппарате (масштаб 24мс); б) тот же процесс (масштаб времени 800 мкс/деление); в) перенапряжение при образовании дуги (масштаб времени 3,7 мкс/деление); г) перенапряжение при погасании дуги (масштаб времени 4мкс/деление).

Установлено, что перенапряжение, возникающее после погасания дуги, зависит от параметров L и C электрической сети, а перенапряжение, возникающее при зажигании электрической дуги, от параметров подключенной емкости не зависит.

Показано, что параметры перенапряжений, получаемых на имитационной установке (рисунок 6), идентичны параметрам перенапряжений (рисунок 4) в электрической сети при отключении КЗ. Так перенапряжение при зажигании дуги на рисунке 4 имеет амплитуду 5,35 кВ, частоту 1,06 МГц, а перенапряжение на рисунке 6 – 5,12 кВ и частоту 1,09 МГц.

Перенапряжение после погасания дуги в данной реальной системе электроснабжения имеет амплитуду 490 В и частоту 41,6 кГц. Это перенапряжение зависит от параметров системы электроснабжения. На имитационной установке частоту перенапряжения после погасания дуги можно изменять в широких пределах 6,2 кГц – 1,4 МГц путем изменения подключаемых емкостей, получая, таким образом, перенапряжения

характерные для различных электрических сетей. Погрешность выполненных измерений с доверительной вероятностью 0,95 составляет не более 15%. Имитационная установка не создает аварийный режим для электрической сети.

Проведение многократных экспериментов и анализа полученных данных позволили:

— определить перенапряжение при образовании электрической дуги, которое обусловлено «взрывом» мостика из жидкого металла. Установлено, что частота этих перенапряжений 1,06 – 1,09 МГц, длительность процесса 10 мкс, среднее значение амплитуды 4.6 – 5.56 кВ с доверительной вероятностью $P=0,95$. При этом отмечается, что скорость нарастания напряжения в этом случае при фронте в 0,5 мкс составляет более 10,0 кВ/мкс.

— установить эмпирическое выражение для расчёта перенапряжений:

$$U_{пер} = 5,08 \cdot e^{-3,15 \cdot 10^5 t} \sin (6,75 \cdot 10^6 t) \text{ кВ} ;$$

— определить, что с доверительной вероятностью 0,95, значение тока при котором происходит погасание электрической дуги, равным 2.1 – 2.7 А, с доверительной вероятностью 0,95. Таким образом, на основе параметров размыкаемых контуров можно определять амплитуды перенапряжений после погасания дуги.

Выполненные экспериментальные исследования по ограничению перенапряжений с помощью сетевого фильтра с помехоподавляющей цепочкой, выполненной по схеме - последовательное соединение варистора и разрядника, показали недостаточную эффективность подавления помехи.

Показано, что амплитуды перенапряжений при отключении аварийных режимов более, чем в три раза превышают амплитуды перенапряжений при нормальной эксплуатации ТС.

Установка ОПН со временем срабатывания менее 25 нС снижает амплитуды коммутационных перенапряжений до значений 445 – 465 В ($1,43 - 1,5 \cdot U_n$), что хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования.

Анализ существующих стандартизированных импульсов напряжения, рекомендуемых для оценки помехоустойчивости технических средств, и зарегистрированного перенапряжения при зажигании электрической дуги позволил сделать вывод о том, что стандартизированные и зарегистрированные импульсы существенно отличаются друг от друга. В результате, в условиях эксплуатации технические средства подвергаются перенапряжениям, отличным от регламентированных импульсов напряжения. Таким образом, для обеспечения гарантийной работы технических средств в условиях реальной электромагнитной обстановки становится недостаточным опираться только на нормативные документы.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию проникновения перенапряжений, характерных для режима отключения тока короткого замыкания, во вторичные цепи импульсных источников питания. Для сравнения эксперименты выполнены для двух вариантов импульсных

источников питания, приведенных на рисунке 7. Эксперименты по проникновению перенапряжений выполнены для случая перенапряжений как в электрической сети, так и полученных от созданной имитационной установки. Разработанные схемы проведения экспериментов приведены на рисунках 8, 9 соответственно.

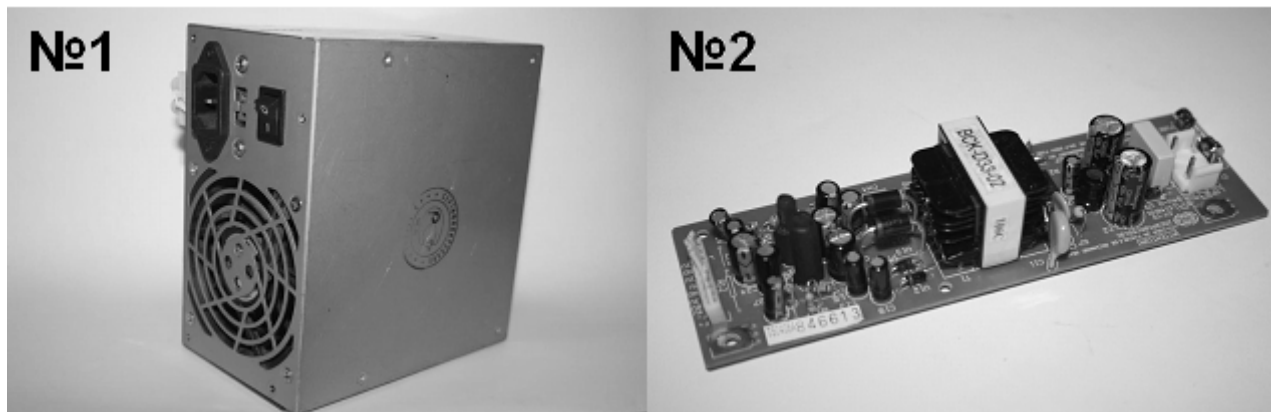


Рисунок 7 - Экспериментальные импульсные источники питания

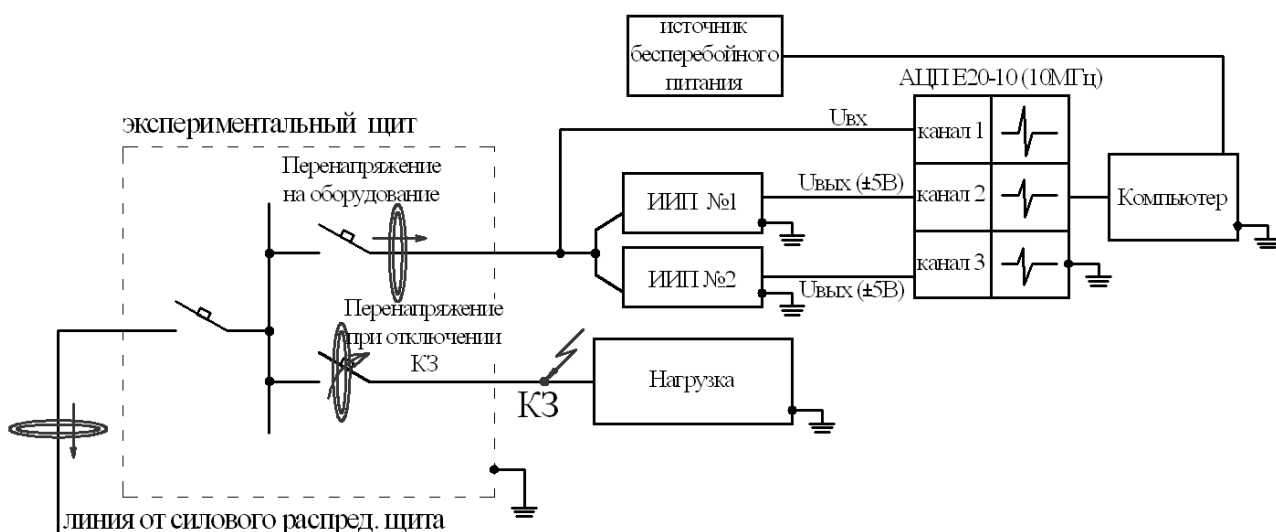


Рисунок 8 - Схема эксперимента в действующей системе электроснабжения

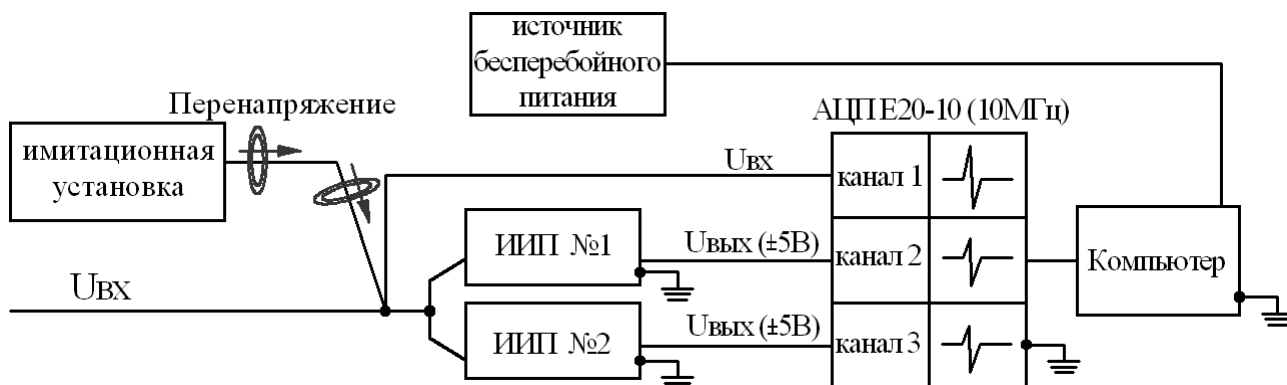


Рисунок 9 - Схема для проведения эксперимента с использованием имитационной установки

В результате проведенных экспериментальных исследований выявлена идентичность влияния перенапряжений при отключении КЗ и перенапряжений, получаемых с помощью имитационной установки, на работу импульсных источников питания. Параметры зарегистрированных ЭМП во вторичном напряжении импульсных источников питания приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры ЭМП во вторичном напряжении импульсных источников питания при воздействии перенапряжений

		перенапряжение на вводных клеммах ИИП							
		при отключении КЗ - 2,12кВ				от имитационной установки - 2,015кВ			
		фронт, мкс	U _{max} , В	W _{max} , мкДж	W _{max2} /W _{max1}	фронт, мкс	U _{max} , В	W _{max} , мкДж	W _{max2} /W _{max1}
параметры ЭМП во вторичном напряжении	ИИП №1	~0,5	5,65	3,71	2,01	~0,5	5,27	3,3	2,05
	ИИП №2		11,71	7,44			11,01	6,75	

При воздействии на импульсные источники питания рассматриваемых перенапряжений показано наличие в их вторичном напряжении ЭМП с энергией, при которой происходит нарушение нормального функционирования микроэлементов. Определено, что в эти элементы входят: маломощные переключательные диоды, микроволновые диоды, маломощные транзисторы и интегральные микросхемы, что приводит к снижению помехоустойчивости ТС в целом.

Показано, что установка ограничителя перенапряжений (ОПН) приводит к уменьшению на вводных клеммах импульсных источников питания амплитуды перенапряжений до значений в 0,485 кВ.

Однако и в этом случае энергия ЭМП во вторичном напряжении ИИП превосходит значение, при котором микроэлементы способны нормально функционировать, а амплитуда ЭМП превосходит порог срабатывания $0,2U_n$.

Сравнение полученных в работе результатов с результатами экспериментальных исследований импульсных источников питания под влиянием стандартных ЭМП, показало, что параметры ЭМП во вторичных напряжениях импульсных источников питания при этом имеют существенные отличия. Так при подаче на вводные клеммы ИИП импульса напряжения 1/50 мкс амплитудой 2,0 кВ, применяемого для имитации режима КЗ, в его вторичном напряжении регистрировались ЭМП с энергией около $1,08 \cdot 10^{-8}$ Дж.

В действительности отключение КЗ в системе электроснабжения приводит к появлению на выходе импульсного источника питания помехи со средней энергией единичного импульса $7,44 \cdot 10^{-6}$ Дж, что практически в 700 раз больше. Отсюда следует, что регламентированных испытаний недостаточно для обеспечения помехоустойчивости ТС в условиях реальной жёсткой ЭМО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка помехоустойчивости технических средств в условиях реальной электромагнитной обстановки на промышленных предприятиях — важная задача современной электроэнергетики. Генераторы с регламентированными импульсами, применяемые для оценки помехоустойчивости ТС, не могут охватить все возможные ситуации возникновения перенапряжений в системах электроснабжения, способных негативно влиять на работу технических средств.

Эффективное исследование помехоустойчивости технических средств становится реальным при использовании разработанной имитационной установки, которая может безаварийно и многократно создавать перенапряжения, соответствующие процессам при отключении аварийных режимов в электрической сети.

Наиболее существенные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Показана возможность возникновения перенапряжений при отключении КЗ амплитудой более 5,0 кВ и частотой 1,06-1,09 МГц, имеющих затухающий характер. Таким образом, в условиях эксплуатации технические средства на высокой стороне подвергаются перенапряжениям, отличным от регламентированных импульсов напряжения, рекомендуемых нормативными документами. Это позволяет сделать вывод о недостаточности испытаний помехоустойчивости для гарантии работы технических средств в условиях реальной жёсткой ЭМО.

2. Разработана, изготовлена и внедрена имитационная установка для создания перенапряжений, соответствующих процессам при отключении КЗ в электрической сети 0,4 кВ. Имитационная установка позволяет безаварийно проводить испытания на помехоустойчивость технических средств под воздействием перенапряжений, соответствующих отключению КЗ в электрической сети. Стоимость установки на порядок меньше выпускаемых в настоящее время регламентированных испытательных генераторов.

3. Показано, что в процессе отключения КЗ возникают перенапряжения:

а) при образовании электрической дуги, что обусловлено «взрывом» мостика из жидкого металла. Перенапряжение имеет колебательный затухающий характер с амплитудой первого импульса 4,6 – 5,56 кВ, частотой 1,06 – 1,09 МГц, с доверительной вероятностью измерений $P = 0.95$ и описывается обобщенной эмпирической формулой

$$U_{nep} = 5,08 \cdot e^{-3,15 \cdot 10^5 t} \sin (6,75 \cdot 10^6 t) \text{ кВ} .$$

б) при погасании дуги. Перенапряжение зависит от параметров размыкаемых конкретных участков цепи и от величины «среза» тока.

4. С доверительной вероятностью измерений 0,95 экспериментально установлено значение тока погасания электрической дуги при отключении КЗ в пределах 2,1-2,7 А. Предложен расчётный способ обоснования появления

перенапряжений на основе параметров размыкаемых контуров.

5. Определено существенное отличие (до 700 раз) энергии ЭМП во вторичном напряжении импульсных источников при воздействии регламентированным импульсом и реальными перенапряжениями. Так, тестирование импульсных источников регламентированным импульсом 1/50 мкс амплитудой 2,0 кВ и реальными перенапряжениями приводит к появлению в его вторичном напряжении значений энергии ЭМП, равных $1,08 \cdot 10^{-8}$ Дж и $7,44 \cdot 10^{-6}$ Дж соответственно.

6. Показано, что при использовании дополнительных средств помехоподавления (сетевой фильтр, ОПН), энергия ЭМП во вторичных напряжениях импульсных источников питания превосходит энергию, необходимую для разрушения или деградации чувствительных микроэлементов, а амплитуда ЭМП превосходит порог срабатывания микросхем $0,2 \cdot U_n$.

7. Для уменьшения амплитуд перенапряжений при отключении КЗ предложено:

- установка высоко нелинейных варисторов со временем срабатывания менее 25 нс;
- установка электрической ёмкости 30 нФ на отходящие линии от распределительных щитов;
- использование силовых трансформаторов подстанций с соединением вторичных обмоток по схеме «зигзаг с нулем», что приводит к уменьшению амплитуды перенапряжения в 1,84 раза при прочих равных условиях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Митюгин, А.А. Исследование высоковольтных электромагнитных помех в электрической сети при отключении тока короткого замыкания / А.А. Митюгин, В.И. Яковлев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. - №1(142). – С. 103 – 107.

Публикации в сборниках трудов Международных конференций:

2. Митюгин, А.А. Модель для проверки защитных мер в однофазной сети / А.А. Митюгин, В.И. Яковлев // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно – практической конференции. Ч.II. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 3 - 4.

3. Митюгин, А.А. Исследование электромагнитных помех, возникающих в электрических сетях низкого напряжения при отключении токов короткого замыкания / А.А. Митюгин, П.И. Моисеенков, Д.Р. Владимиров // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды международной научно – технической конференции: сборник статей. – Самара: Изд-во СамГТУ, 2011. – Т.2. – С. 265 – 268.

Публикации в сборниках научных трудов и докладов:

4. Митюгин, А.А. Разработка модели электрической сети низкого напряжения в программе MatLab для спектрального анализа помех,

возникающих в аварийных режимах систем электроснабжения / А.А. Митюгин, П.И. Моисеенков, Д.Р. Владимиров // Научные проблемы специальных и фортификационных комплексов, обустройства войск, управления производственной деятельностью строительных предприятий, материально – технического обеспечения ВС РФ и социологии образования в вузах МО РФ: сб. науч. трудов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. Вып. 10. – С. 257 – 265.

5. Митюгин, А.А. Влияние несимметричных режимов функционирования электроприемников на работу трансформаторов 10/0.4 кВ с различными схемами соединения обмоток / П.И. Моисеенков, Д.Р. Владимиров, А.А. Митюгин // Научные проблемы специальных и фортификационных комплексов, обустройства войск, управления производственной деятельностью строительных предприятий, материально – технического обеспечения ВС РФ и социологии образования в вузах МО РФ: сб. науч. трудов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. Вып. 10. – С. 266 – 278.

6. Митюгин, А.А. Современные способы подавления гармоник тока в системах электроснабжения / П.И. Моисеенков, Д.Р. Владимиров, А.А. Митюгин // Научные проблемы специальных и фортификационных комплексов, обустройства войск, управления производственной деятельностью строительных предприятий, материально – технического обеспечения ВС РФ и социологии образования в вузах МО РФ: сб. науч. трудов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. Вып. 10. – С. 279 – 294.

7. Митюгин, А.А. Экспериментальное исследование параметров отключения тока однофазного короткого замыкания на автоматических выключателях в действующих сетях низкого напряжения и их действие на измерительные каналы оборудования / А.А. Митюгин, П.И. Моисеенков, Д.Р. Владимиров // Научные проблемы специальных и фортификационных комплексов, обустройства войск, управления производственной деятельностью строительных предприятий, материально – технического обеспечения ВС РФ и социологии образования в вузах МО РФ: сб. науч. трудов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. Вып. 10. – С. 295 – 299.