*Тимонин Илья Александрович. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЗАЩИТЕ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Тимонин Илья Александрович;[Место защиты: Московский энергетический институт (технический университет)].- Москва, 2014.- 128 с.*

*ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"*

*На правах рукописи*

*Тимонин Илья Александрович*

*РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЗАЩИТЕ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО*

*ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ*

*Специальность 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические*

*системы»*

*Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук*

*Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гусев Ю. П.*

*Москва, 2013 г.*

*ОГЛАВЛЕНИЕ*

*ОГЛАВЛЕНИЕ 2*

*ВВЕДЕНИЕ 5*

*ГЛАВА 1. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА 13*

*1.1. Типовые схемы и состав систем оперативного постоянного тока 13*

*1.2. Проблемы электромагнитной совместимости 22*

*1.3. Импульсные коммутационные перенапряжения 30*

*1.4. Сравнение устройств защиты от перенапряжений 32*

*1.5. Выводы 40*

*ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ*

*ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖПОЛЮСНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ,*

*ВЫЗЫВАЕМЫХ СРАБАТЫВАНИЕМ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ 41*

*2.1. Введение 42*

*2.2. Физические процессы при отключении коротких замыканий*

*предохранителем 47*

*2.2.1. Стадии развития и гашения дуги 47*

*2.2.2. Плавление вставки предохранителя 49*

*2.2.3. Влияние продольной теплопередачи 51*

*2.2.4. Практические выводы 52*

*2.3. Сведения о программе EMTP-RV 53*

*2.4. Расчетная схема и основные уравнения модели 54*

*2.5. Реализация модели в EMTP-RV 60*

*2.6. Реализация модели в Mathcad 67*

*2.7. Верификация модели 71*

*2.7.1. Сопоставление результатов моделирования в EMTP-R V и Mathcad 71*

*2.7.2. Сопоставление результатов моделирования и данных фирмы-*

*производителя 75*

*2.7.3. Допустимость представления схем замещения элементов*

*сосредоточенными параметрами 80*

*2.8. Выводы 80*

*ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ЗАЩИТЫ 82*

*3.1. Введение 82*

*3.2. Межполюсное коммутационное перенапряжение 82*

*3.2.1. Описание условий исследования 82*

*3.2.2. Вариант без использования защиты от перенапряжений 82*

*3.2.3. Вариант с использованием устройства защиты от импульсных*

*перенапряжений 85*

*3.2.4. Анализ результатов 88*

*3.3. Перенапряжение между полюсом и землей 89*

*3.3.1. Общие сведения 89*

*3.3.2. Вариант с использованием устройства защиты от импульсных*

*перенапряжений 90*

*3.3.3. Вариант с использованием диодной защиты 92*

*3.3.4. Анализ результатов 95*

*3.4. Перенапряжение при отключении соленоида включения высоковольтного*

*выключателя 95*

*3.4.1. Описание условий исследования 95*

*3.4.2. Сравнение эффективности диодной защиты и устройства защиты от*

*импульсных перенапряжений 96*

*3.4.3. Анализ результатов 99*

*3.5. Натурные испытания по отключению коротких замыканий в системе*

*оперативного постоянного тока автоматическими выключателями 101*

*3.5.1. Цель, объект и задачи испытаний 101*

*3.5.2. Технические средства 102*

*3.5.3. Анализ результатов 107*

*3.6. Выводы*

*ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТЕ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ 113*

*4.1. Введение 113*

*4.2. Рекомендации по выбору защиты от перенапряжений 113*

*4.3. Выводы 117*

*ЗАКЛЮЧЕНИЕ 119*

*СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 121*

*ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПИСЬМО О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТ ОАО «ФСК ЕЭС» 128*

*ВВЕДЕНИЕ*

*Актуальность работы. Опыт эксплуатации низковольтных установок постоянного тока на электростанциях (ЭС) и подстанциях (ПС) свидетельствует о периодически возникающих случаях появления перенапряжений в этих сетях. Ранее, когда релейная защита (РЗ) выполнялась на базе электромеханических реле, перенапряжения не вызывали существенных проблем. С внедрением микропроцессорной техники, более чувствительной к перенапряжениям, возникла опасность повреждений и ложных срабатываний релейной защиты и автоматизированных систем управления ЭС и ПС. Это, в свою очередь, может вызывать серьёзные аварии на энергообъектах страны. Скудная статистика таких аварий объясняется отсутствием системы сбора и анализа подобной информации, а также объективными трудностями в определении истинных первопричин аварий.*

*Данная работа посвящена разработке рекомендаций по защите установок постоянного оперативного тока от перенапряжений. Система оперативного постоянного тока (СОПТ) предназначена для снабжения электроэнергией устройств релейной защиты, автоматики и сигнализации, а также аварийного освещения и ответственных механизмов собственных нужд, в том числе электроприводов силовых выключателей. СОПТ должна обеспечивать надежное снабжение электроприемников как в нормальном, так и в аварийных режимах работы энергообъекта.*

*С внедрением микропроцессорных устройств релейной защиты значительно усиливаются требования к качеству питания и электромагнитной совместимости электроприемников и систем питания. Изменение состава электроприемников постоянного тока приводит к необходимости пересмотра требований к устройствам защиты от перенапряжений. В настоящее время, в России, наметилась не всегда оправданная тенденция к использованию зарубежных средств защиты и необоснованному отказу от проверенных практикой отечественных защитных устройств.*

*Решить эти проблемы может разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору способов и средств защиты от перенапряжений в СОПТ с учетом современных требований к качеству электропитания.*

*Ввиду того, что система оперативного постоянного тока является неотъемлемой частью любой электрической станции и подстанции напряжением 110 кВ и выше, задача повышения надежности работы таких систем является масштабной и актуальной.*

*Объектом исследования является система оперативного постоянного тока подстанций 110-750 кВ с устройствами защиты от перенапряжений на базе силовых диодов и варисторов.*

*Предметом исследования являются переходные процессы в СОПТ, сопровождающиеся перенапряжениями, с учетом влияния на них устройств защиты: диодов и варисторов.*

*Целью диссертации является разработка рекомендаций по защите СОПТ от перенапряжений с учетом современных требований к электромагнитной совместимости и качеству электропитания микропроцессорных устройств для предотвращения повреждений и ложных срабатываний релейной защиты и автоматики подстанций 110-750 кВ.*

*Задачи исследования. Для достижения цели исследования поставлены и решены следующие задачи:*

*1) анализ схем и состава СОПТ, оценка электромагнитной обстановки, анализ факторов, влияющих на параметры перенапряжений, современных тенденций изменения состава потребителей и применяемых устройств защиты от перенапряжений в СОПТ;*

*2) разработка математической модели СОПТ для исследования*

*электромагнитных переходных процессов, сопровождающихся*

*перенапряжениями, расчетно-экспериментальное исследование процесса*

*возникновения перенапряжения в СОПТ при срабатывании плавких пр едохр анителей;*

*3) расчетно-экспериментальное исследование процесса ограничения перенапряжений в СОПТ с помощью диодной защиты и устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) на основе варисторов, сравнение эффективности указанных способов защиты; проведение натурных экспериментов по отключению коротких замыканий (КЗ) в СОПТ, оценка параметров перенапряжений;*

*4) разработка рекомендаций по защите СОПТ от перенапряжений с учетом современных требований к качеству электропитания микропроцессорных устройств.*

*Методы исследования. Решение поставленных задач производилось с помощью математического моделирования на основе системы линейных алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа, математического моделирования на основе теории обыкновенных дифференциальных уравнений, расчетно - экспериментального исследования в специализированной компьютерной программе EMTP-RV, натурных экспериментов на учебной исследовательской установке постоянного тока фирмы Gutor кафедры «Электрические станции».*

*Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:*

*1) проведен анализ эффективности защиты СОПТ от перенапряжений, вызванных отключающими защитными аппаратами, электрической дугой, воздействием электромагнитных полей, выявлены преимущества диодной защиты по сравнению с УЗИП комбинированного и ограничивающего типов. Показано, что напряжения среза УЗИП в 2-3 раза выше напряжения среза диодной защиты, а способность к поглощению энергии в несколько раз ниже, чем у диодов.*

*2) разработана математическая модель для исследования*

*электромагнитных переходных процессов,*

*перенапряжениями, содержащая отключающие защитные аппараты, силовые диоды и варисторы. Модель учитывает влияние активных и индуктивных сопротивлений кабельной сети и аккумуляторной батареи, емкостей полюсов относительно земли и постоянной времени цепи КЗ, позволяет оценивать основные параметры возникающих импульсов перенапряжений: амплитуду, длительность фронта, длительность полуспада и энергию.*

*3) проведено исследование эффективности защиты СОПТ от перенапряжений с помощью силовых диодов и УЗИП, преимуществ и недостатков применения данных устройств. Были рассмотрены случаи возникновения и ограничения внутренних межполюсных коммутационных перенапряжений при отключении КЗ предохранителем, внешних перенапряжений между полюсом и землей, а также перенапряжений, возникающих при отключении соленоида включения высоковольтного выключателя.*

*4) разработаны рекомендации по защите СОПТ от перенапряжений с учетом современных требований к качеству электропитания микропроцессорных устройств. Даны научно-обоснованные рекомендации по выбору мест присоединения, подбору параметров защитных устройства, конструктивного исполнения, способу подключения, защите выбранных устройств от сверхтоков.*

*Достоверность научных положений диссертационной работы обусловлена корректным использованием теории электромагнитных переходных процессов, теоретических основ электротехники, обоснованностью принятых допущений и удовлетворительным совпадением результатов расчетов, полученных при использовании разработанной математической модели, реализованной в программных комплексах EMTP-RV и Mathcad с данными, предоставляемыми производителями защитных аппаратов. Расхождение между сопоставляемыми параметрами не превысило 10%.*

*Научные положения, выносимые на защиту:*

*1) математическая модель СОПТ для исследования электромагнитных переходных процессов, сопровождающихся перенапряжениями. с отключающими защитными аппаратами, силовыми диодами и варисторами;*

*2) результаты исследования эффективности средств защиты СОПТ от различных видов перенапряжений с помощью силовых диодов и УЗИП;*

*3) рекомендации по защите от перенапряжений в СОПТ с учетом современных требований к качеству электропитания микропроцессорных устройств.*

*Практическая значимость и область применения результатов:*

*- результаты исследования эффективности устройств защиты от перенапряжений при отключении КЗ плавкими предохранителями могут быть использованы для оценки параметров возникающих импульсов перенапряжений при проектировании на этапе разработки схемы СОПТ, выбора защитных аппаратов и устройств защиты от перенапряжений.*

*- разработанные рекомендации по защите СОПТ от перенапряжений были использованы на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» при разработке с участием автора внедренного и действующего стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007 - 29.120.40.041 - 2010 «Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования» и его изменений от 14.12.2012 г.*

*Апробация и внедрение результатов работы. Работа была апробирована на следующих конференциях:*

*- на Пятнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика» (МЭИ, 26-27 февраля, г. Москва, 2009 г.);*

*- на Шестнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика» (МЭИ, 26-27 февраля, г. Москва, 2010 г.);*

*- на Семнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика» (МЭИ, 24-25 февраля, г. Москва, 2011 г.),*

*- на XXXIV сессии семинара «Кибернетика энергетических систем» по тематике «диагностика энергооборудования» (ЮРГТУ (НПИ), 25-27 сентября, г. Новочеркасск, 2012 г.).*

*В приложении 1 приводится письмо о внедрении результатов диссертационной работы от ОАО «ФСК ЕЭС».*

*Публикации. По результатам исследований было опубликовано шесть печатных работ, в том числе две в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикаций материалов диссертационных работ.*

*Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, состоящего из 69 наименований, одного приложения. Основной текст изложен на 120 страницах, включает 68 рисунков и 16 таблиц. Общий объем диссертации составил 128 страниц.*

*В первой главе приведен обзор публикаций, описаны типовые схемы и состав потребителей, охарактеризована электромагнитная обстановка в СОПТ. Рассмотрены причины возникновения перенапряжений в СОПТ, влияющие факторы, особенности коммутаций на постоянном токе, перечислены основные способы защиты: схемные решения, применение выпрямительных диодов, устройств защиты от импульсных перенапряжений на основе варисторов и разрядников. Приведены технические характеристики защитных устройств и сведены для удобства сравнения в общую таблицу характеристик.*

*Во второй главе разработана математическая модель для исследования электромагнитных переходных процессов, сопровождающихся межполюсными перенапряжениями при отключении КЗ плавкими предохранителями. Модель реализована в среде EMTP-RVиMathcad. Рассмотрены физические процессы, при отключении коротких замыканий плавкими предохранителями. Приведено описание основных элементов расчетной модели. Произведена верификация результатов, полученных с помощью разработанной модели. Обоснована допустимость представления элементов расчетной схемы сосредоточенными параметрами*

*В третьей главе произведено моделирование процесса ограничения межполюсных коммутационных перенапряжений с помощью УЗИП. Произведено сравнение эффективности ограничений перенапряжений между полюсом и землей с помощью диодной защиты и УЗИП ограничивающего типа на основе варисторов. Рассмотрен случай возникновения перенапряжений при отключении в аварийных условиях соленоида включения высоковольтных выключателей У-110 и У-220, выполнено сравнение эффективности режекции возникающих при этом перенапряжений варисторами и диодами. Моделирование проводилось с использованием программы EMTP-RV.*

*Таким образом, было проведено исследование процесса ограничения перенапряжений в СОПТ различными устройствами защиты, на основании полученных результатов сделаны выводы об эффективности рассмотренных защитных устройств.*

*В четвертой главе приведены рекомендации по выбору устройств защиты СОПТ от перенапряжений с учетом современных требований по электромагнитной совместимости и качеству электропитания микропроцессорных устройств подстанций напряжением 110-750 кВ. Даны рекомендации выбору типа защитных устройств, мест присоединения, подбору параметров защитных устройства, конструктивного исполнения, способу подключения, защите выбранных устройств от сверхтоков.*

*Таким образом, рекомендовано в щите постоянного тока (ЩПТ) применять диодную защиту, вследствие большей её эффективности для режекции импульсов перенапряжений полюс - земля, а также возможных импульсов при отключении соленоидов включения высоковольтных выключателей.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В программном пакете *EMTP-RV* разработана математическая модель СОПТ для исследования электромагнитных переходных процессов, сопровождающихся перенапряжениями при отключении КЗ плавкими предохранителями. Модель позволяет оценить основные параметры возникающего импульса перенапряжения, получить осциллограммы напряжения и тока. Достоверность модели проверена путем сопоставления расчетных данных по токам и напряжениям с данными, предоставляемыми производителями защитных аппаратов. Расхождение между сопоставляемыми параметрами не превысило 10%.
2. Выявлены преимущества диодной защиты по сравнению с УЗИП комбинированного и ограничивающего типов. Напряжения среза УЗИП в 2-3 раза выше напряжения среза диодной защиты, а способность к поглощению энергии в несколько раз ниже, чем у диодов.
3. Подтверждена эффективность диодной защиты в качестве устройства защиты от перенапряжений микропроцессорной релейной защиты. Применение диодной защиты позволяет значительно уменьшить количество отказов РЗА по причине нарушения ЭМС со стороны СОПТ - до 10% процентов.
4. Установлено, что ограничения межполюсных перенапряжений, возникающих в СОПТ при отключении коротких замыканий предохранителями, не обеспечиваются ни диодной защитой, ни УЗИП, включаемыми между полюсами СОПТ и землей. Для предотвращения такого рода перенапряжений следует уменьшать индуктивность цепей питания электроприемников.
5. Разработаны рекомендации по выбору устройств защиты от перенапряжений в СОПТ. Рекомендовано на ЩПТ применять диодную защиту. Класс обратного повторяющегося напряжения диодов следует выбирать не ниже 18. Диоды должны быть защищены скоординированными с ними по току и защитному показателю плавкими предохранителями в составе устройства типа предохранитель-разъединитель.

Указанные рекомендации по защите СОПТ от перенапряжений были использованы при разработке с участием автора внедренного и действующего стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007 - 29.120.40.041 - 2010 «Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования» и его изменений от 14.12.2012 г.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В программном пакете EMTP-RV разработана математическая модель СОПТ для исследования электромагнитных переходных процессов, сопровождающихся перенапряжениями при отключении КЗ плавкими предохранителями. Модель позволяет оценить основные параметры возникающего импульса перенапряжения, получить осциллограммы напряжения и тока. Достоверность модели проверена путем сопоставления расчетных данных по токам и напряжениям с данными, предоставляемыми производителями защитных аппаратов. Расхождение между сопоставляемыми параметрами не превысило 10%.

2. Выявлены преимущества диодной защиты по сравнению с УЗИП комбинированного и ограничивающего типов. Напряжения среза УЗИП в 2-3 раза выше напряжения среза диодной защиты, а способность к поглощению энергии в несколько раз ниже, чем у диодов.

3. Подтверждена эффективность диодной защиты в качестве устройства защиты от перенапряжений микропроцессорной релейной защиты. Применение диодной защиты позволяет значительно уменьшить количество отказов РЗА по причине нарушения ЭМС со стороны СОПТ - до 10% процентов.

4. Установлено, что ограничения межполюсных перенапряжений, возникающих в СОПТ при отключении коротких замыканий предохранителями, не обеспечиваются ни диодной защитой, ни УЗИП, включаемыми между полюсами СОПТ и землей. Для предотвращения такого рода перенапряжений следует уменьшать индуктивность цепей питания электроприемников.

5. Разработаны рекомендации по выбору устройств защиты от перенапряжений в СОПТ. Рекомендовано на ЩПТ применять диодную защиту. Класс обратного повторяющегося напряжения диодов следует выбирать не ниже 18. Диоды должны быть защищены скоординированными с ними по току и защитному показателю плавкими предохранителями в составе устройства типа предохранитель-разъединитель.

Указанные рекомендации по защите СОПТ от перенапряжений были использованы при разработке с участием автора внедренного и действующего стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007 - 29.120.40.041 - 2010 «Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования» и его изменений от 14.12.2012 г.