

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение/НОЦ Электроэнергетика и электротехника

Профиль Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надёжность

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование перспектив применения вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа

УДК 621.316.542:621.316.935

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Г	Романенко Полина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Хрущев Юрий Васильевич	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Завьялов В.М.	д.т.н., профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

**по основной образовательной программе подготовки магистров
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P1	<i>Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.</i>	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.</i>	Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	<i>Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.</i>	Требования ФГОС (ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ПК-31), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<i>Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.</i>	Требования ФГОС (ОК-8, ОК-9, ПК-14, ПК-19), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.</i>	Требования ФГОС (ПК-1, 2, 36) ¹ , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P6	<i>Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.</i>	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7,9). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	Требования ФГОС (ПК-10, 11, 12, 13). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-14, 36, 39 –44). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-19, ПК-23, ПК-27, ПК-30, ПК-31, ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-45, ПК-46), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	<i>Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.</i>	Требования ФГОС (ПК-15, ПК-47, ПК-48, ПК-49, ПК-50), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-28, ПК-33, ПК-40, ПК-41, ПК-44), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение школы Электроэнергетика и электротехника

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
Дементьев Ю.Н.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Г	Романенко Полина Сергеевна

Тема работы:

Исследование перспектив применения вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№347/с от 24.01.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

09.06.2018 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Материалы кафедры ЭСиЭ.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Методы и средства, направленные на решение основных задач в области токограничения в ЭЭС. 2. Построение моделирующего комплекса к исследованию коммутационных переходных процессов в электрических сетях 3. Исследование шунтирующего способа ограничения параметров коммутационных

	переходных процессов в электрических сетях.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.э.н., доцент Попова С.Н.
Социальная ответственность	к.т.н., доцент Дашковский А.Г.
Английская часть	к.п.н., доцент Зюбанов В.Ю.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Способы и средства ограничения параметров коммутационных переходных процессов в электрических сетях.	
Подготовка моделирующего комплекса и программа исследований ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях	
Анализ исследований и перспективы применения вакуумных ТОУ шунтирующего типа в электрических сетях	
Экономическая часть.	
Безопасность жизнедеятельности.	
Часть ВКР на иностранном языке.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Хрущев Ю.В.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Г	Романенко П.С.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Г	Романенко П.С.

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭСИЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Проделано следующее: 1. Представлена организационная структура проекта; 2. Рассчитана смета затрат на разработку проекта</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Себестоимость проекта составила 389,5 тыс. руб.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Не рассчитывается для данного проекта.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Инновационный потенциал проекта заключается в следующем: разработанные принципы построения системы могут быть использованы для создания вакуумного ТОУ шунтирующего типа не имеющего аналогов. Применение таких ТОУ позволяет существенно снизить затраты при строительстве новых ПС</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Проект выполняет в рамках магистерской диссертации, устав не требуется.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Составлен план выполнения проекта, определены денежные и человеческие ресурсы.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *График трудовых ресурсов*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Г	Романенко П.С.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 104 с., 36 рис., 7 табл., 49 источников.

Ключевые слова: токоограничивающее устройство, вакуумный выключатель, коммутация, переходный процесс, подстанция, ограничение тока короткого замыкания, управляемый.

Объектом исследования является разработка вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа.

Цель работы – разработка инновационного подхода в построения подстанций для облегчения условий работы линейных коммутационных аппаратов на действующих подстанциях. Ограничение токов короткого замыкания и снижение их пагубного влияния на оборудование сети.

В процессе исследования рассматривались теоретические обоснования исследования работы вакуумных выключателей в качестве токоограничивающих устройств, а также практические наработки зарубежных ученых, и опыты, поставленные сотрудниками Томского политехнического университета.

В результате исследования произведён обзор лучших практик в научной среде, поставлены задачи дальнейшей экспериментальной работы. Проведена теоретическая проработка возможности реализации предлагаемого устройства с использованием моделирующего комплекса и синтетической схемы.

Область применения: подготовленный материал может использоваться в дальнейших исследованиях, посвященных данной тематике.

Экономическая эффективность/значимость работы: так как выводы показывают снижение требования к отключающей способности линейных выключателей при использовании вакуумных выключателей в качестве токоограничения, следовательно возможна значительная экономическая выгода за счет снижения общей стоимости линейных выключателей на фидерах подстанции.

Список используемых сокращений

ВДК – вакуумная дугогасительная камера

ВКР – Выпускная квалификационная работа

ЕЭС – единая энергетическая система

КЗ – короткое замыкание

ЛЭП – линия электропередачи

ОПН – ограничитель перенапряжений

ПАО – публичное акционерное общество

ПВН – переходное восстанавливающееся напряжение

ПС – подстанция

ПУЭ – правила устройства электроустановок

РВУ – управляемый вакуумный разрядник

СМ – синхронная машина

ТОУ – токоограничивающее устройство

ФСК – федеральная сетевая компания

ЭМ – электрическая машина

ЭС – электрическая сеть

Оглавление

Введение	11
Глава 1 Способы и средства ограничения параметров коммутационных переходных процессов в электрических сетях.....	16
1.1 Общая характеристика коммутационных переходных процессов	16
1.2 Ограничение параметров переходных процессов в нормальных условиях работы электрической сети	20
1.3 Ограничение параметров переходных процессов в аварийных условиях работы электрической сети	21
1.4 Направления исследований по разработке эффективных средств ограничения параметров коммутационных переходных процессов в электрических сетях.....	24
1.5 Возможность применения вакуумных коммутационных аппаратов в качестве ТОУ	32
1.6 Процессы при работе вакуумных коммутационных аппаратов.....	34
1.7 Управление коммутацией как способ ограничения параметров переходных процессов в электрических сетях	39
1.8 Выводы по главе.....	43
Глава 2 Подготовка моделирующего комплекса и программа исследований ограничения токов короткого замыкания в ЭС.....	44
2.1 Модель фрагмента электрической сети для проведения исследований	45
2.2 Модели элементов электрической сети в формате моделирующего комплекса	46
2.3 Программа исследований ограничения токов короткого замыкания и апробация модели	62
2.4 Выводы по главе.....	66
Глава 3 Анализ исследований и перспективы применения вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа в электрических сетях	67
3.1 Процессы аварийного отключения элементов электрической сети	67
3.2 Перспективы применения вакуумных токоограничивающих устройств	79

3.3 Выводы по главе.....	82
Заключение.....	83
Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	85
4.1 Экономическая модель проекта	85
4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	86
4.3 Расшифровка работ по выбранному проекту.....	89
4.4 Вывод по разделу	94
Список литературы:	95

Введение

Надежное и эффективное функционирование электроэнергетики, бесперебойное снабжение потребителей – основа поступательного развития экономики страны. Современные мощные энергообъединения представляют собой сложнейшие большие энергосистемы с большим количеством малых энергосистем. Управление развитием и функционированием энергообъединения – важная научно-техническая и экономическая проблема.

Задачи управления крупными энергообъединениями на современном этапе развития электроэнергетики приобретают важнейшее значение.

В настоящее время с учетом геополитических событий, заключением ряда международных договоров экономического характера Российская Федерация взяла курс на импортозамещение и экспорт, что в прямой мере и неразрывно связано с отраслью электроэнергетики.

Как следствие увеличиваются генерируемые мощности, происходит усиление связей с соседними энергосистемами, создаются крупные объединенные системы, охватывающие не только территории отдельных стран, но и целые континенты. Что в свою очередь приводит к росту токов КЗ.

Требования к электрическим аппаратам и оборудованию определяются максимальным уровнем токов короткого замыкания. Поэтому токи КЗ становятся критическим параметром, препятствующим развитию электрических систем.

Поэтому необходимо усовершенствование изоляции трансформаторов, замена установленных выключателей на выключатели с более высокой отключающей способностью, которые обладают большими весогабаритными показателями. Также могут быть приняты и другие технические меры по защите сети от КЗ, приводящие к удорожанию и усложнению оборудования. Также проблема может быть решена с помощью специальных

токоограничивающих устройств. Таких как: предвключаемые резисторы, демпфирующие реакторы, тиристорные ТОУ шунтирующего типа.

Таким образом, величину максимального уровня тока КЗ можно считать технико-экономическим параметром, определяющим целесообразность замены оборудования на новое, с большей термической и динамической стойкостью или использование токоограничивающих устройств. Учитывая, что замена оборудования – достаточно высокочатратный путь, на сегодняшний день активно исследуются и разрабатываются токоограничивающие устройства (ТОУ) и мероприятия, нацеленные на ограничение уровней токов КЗ.

Возросший интерес к этому вопросу связан с актуальностью проблемы и развитием электротехники, что способствует созданию новых типов устройств токоограничения.

Например, по данным специалистов ПАО «ФСК ЕЭС» и Межрегиональных распределительных сетевых компаний, на сегодняшний день токи КЗ на ряде подстанций приближены к предельным значениям по отключающей способности выключателей, что не позволяет увеличивать нагрузку при реконструкции данных подстанций и строительство новых линий связи с вводом генерирующих источников. На данный момент в сетях подстанций, электростанций и промышленных предприятий, напряжением до 35 кВ ограничение токов КЗ осуществляется, преимущественно, применением трансформаторов с расщепленными обмотками и токоограничивающих, демпфирующих, реакторов. Основными мероприятиями по снижению токов КЗ в сетях высокого напряжения, выше 35 кВ – схемно-технические решения, с помощью которых обеспечивается секционирование сети и организация автоматического деления сети при аварийных режимах.

Но такие решения обладают негативным эффектом. Ограничение токов КЗ этими способами достигается путем увеличения суммарного реактивного сопротивления сети, поэтому их применение снижает надежность

электроснабжения потребителей, влечет за собой увеличение потерь в ЭС, приводит к снижению качества напряжения на шинах потребителя.

Проблема ограничения токов КЗ весьма актуальна для всех стран мира. Над решением данной проблемы работают многие крупные компании и международные организации ученых, например, IEEE и СИГРЭ.

Использование в электрических сетях ТООУ нового типа должно решать следующие проблемы:

- возможность продолжить использовать существующее на станциях и подстанциях коммутационное оборудование при введении дополнительных мощностей или вводе новых линий;
- возможность снижения затрат на коммутационное оборудование на новых проектируемых объектах;
- повышение надежности работы системы за счёт отказа от секционирования электрических сетей 110 – 500 кВ;
- возможность повышения надежности питания промышленных предприятий;
- снижение тепловых и электродинамических воздействий с помощью ограничения ударных и установившихся токов КЗ, способствующего повышению надежности и уменьшению износа имеющегося электрооборудования;
- возможность распределения электрической энергии с шин генераторного напряжения;
- уменьшение потерь электроэнергии и напряжения за счет замены традиционных токоограничивающих реакторов.

Одним из вариантов решения проблемы ограничения токов КЗ может быть использование вакуумного выключателя в качестве токоограничивающего устройства шунтирующего типа. Такое устройство

необходимо установить на подстанции на шинах низкого напряжения параллельно группе защищаемых присоединений. Принцип работы заключается в создании искусственного короткого замыкания (шунтировании), которое перераспределяет аварийный ток КЗ между цепью повреждённого фидера и цепью вакуумного ТОУ шунтирующего типа, что влечет снижение тока в защищаемой ветви и позволяет произвести отключение аварийного тока КЗ при наиболее благоприятных условиях для фидерного выключателя (меньшее значение протекающего тока КЗ, отсутствие переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) в момент отключения), после чего необходимо отключить ток КЗ вакуумным ТОУ шунтирующего типа.

Вакуумное ТОУ шунтирующего типа – коммутационное устройство, которое одновременно выполняет функции короткозамыкателя и выключателя. Поэтому к нему применяются следующие требования:

- быстрое включение (единицы миллисекунд) и способность выдерживать токи КЗ в течение определенного установленного времени (функции короткозамыкателя).
- отключение токов КЗ и способность выдерживать ПВН (функции выключателя).

Исследуемые вакуумные ТОУ шунтирующего типа позволяют отключать токи КЗ большой величины. Вакуумные ТОУ представляют собой аналог тиристорного ТОУ: у него есть два основных и один (или более) управляющий электрод. Когда на сигнал управления приходит команда на управляющий электрод происходит включение основной цепи.

Таким образом, задача использования вакуумных выключателей в качестве ТОУ актуальна и может способствовать расширению области их применения, а также возможности создания принципиально новых ТОУ для электротехники и электроэнергетики.

Цель данной работы – рассмотреть возможность применения вакуумных коммутационных аппаратов в качестве токоограничивающих устройств шунтирующего типа. Ограничение токов короткого замыкания и снижение их пагубного влияния на оборудование сети.

Основные задачи:

- Изучить способы и средства ограничения параметров коммутационных переходных процессов в электрических сетях
- Экспериментальное и теоретическое исследование отключающей способности вакуумных выключателей.
- Исследовать адаптивные способы ограничения параметров коммутационных переходных процессов в вакуумных выключателях
- Подготовить моделирующий комплекс к исследованию коммутационных переходных процессов
- Анализ данных, полученных в результате экспериментов и расчетов.

Методы исследования: Для экспериментального исследования использовался программный комплекс Mathlab Simulink.

Научная новизна: Впервые проведены исследования процессов отключения тока ТОУ вакуумного типа для сетей промышленной частоты.

Цели и задачи магистерской ВКР сформулированы научным руководителем совместно с магистрантом.

Практическая ценность работы: По результатам проведенных исследований был предложен ряд методик и мер, позволяющих разрабатывать новые типы ТОУ с повышенными параметрами для применения в сетях среднего напряжения.

Глава 1 Способы и средства ограничения параметров коммутационных переходных процессов в электрических сетях

При любых изменениях в электрической сети (включении, выключении, коротком замыкании, обрыве, скачкообразном изменении какого-либо параметра сети или амплитуды, частоты или фазы напряжения источника и т.п.), называемых коммутациями, в ней возникают переходные процессы.

Переходный (динамический, нестационарный) процесс – процесс, который возникает в электрической сети при переходе от одного установившегося состояния работы сети к другому.

1.1 Общая характеристика коммутационных переходных процессов

Режим электрической системы – состояние, характеризуемое значениями параметров режима. Параметрами, характеризующими режим электрической системы, являются мощность, напряжение, частота и другие физические величины.

В электрических системах выделяют две разновидности режимов: установившийся режим и переходный режим.

Установившийся режим – режим электрической системы, имеющий практически неизменные или повторяющиеся периодически мгновенные значения токов и напряжений в сети. В реальности параметры электрических сетей непостоянны, это может быть связано с изменением нагрузки, наведенными помехами и другими незначительными возмущающими воздействиями. Поэтому колебания параметров около некоторого среднего значения, могут быть настолько малы, что режим можно считать установившимся.

Переходный режим (переходный процесс) в электрических сетях – процесс перехода сети из одного установившегося состояния (режима) в

другое. То есть это режим с резкими значительными изменениями параметров режима.

Переходные процессы, сопровождающиеся изменением электрического состояния элементов системы, могут быть обусловлены естественными причинами или работой устройств автоматики.

Выделяется три вида переходных процессов:

1. Волновые
2. Электромагнитные
3. Электромеханические

Волновые переходные процессы – процессы, при которых происходит местное изменение электрического состояния системы, которое сопровождается резким увеличением электрического разряда в ЛЭП с повышением напряжения, вызванного атмосферными воздействиями. Скорость протекания волновых переходных процессов лежит в диапазоне от 10^3 – до 10^8 Гц (быстродействующие). При волновых переходных процессах возникают перенапряжения, которые имеют пагубное влияние на изоляцию элементов электрической системы и могут привести к ее повреждению.

Электромеханические переходные процессы – процессы при которых происходит изменение электрических и механических параметров режима. Они являются низкочастотными процессами: скорость изменения параметров от 10^{-1} – до 50 Гц.

Электромагнитные переходные процессы – процессы, при которых изменяется электромагнитное состояние элементов электрической системы. При этом механические параметры режима остаются неизменными. Такие переходные процессы длятся от 0.0066 – до 0.02 с, что соответствует скорости протекания от 50 – до 150 Гц.[1,2]

Электромагнитные переходные процессы могут быть вызваны:

– включением и отключением двигательных и других агрегатов;

- короткими замыканиями (КЗ) и простыми замыканиями;
- местной несимметрией;
- форсировкой возбуждения, регуляторами возбуждения, автоматами гашения поля и т.п.;
- включением синхронных машин (СМ) на несинхронную работу.

Наиболее распространенными электромагнитными переходными процессами являются процессы, вызванные короткими замыканиями

Возникновение переходных процессов в ряде случаев нежелательно и опасно. Переходные процессы могут сопровождаться большими перенапряжениями, сверхтоками, электромагнитными колебаниями, которые способны нарушить нормальную работу энергосистемы, оказывая негативное влияние на электрооборудование, вплоть до выхода из строя.

Элементы электрических сетей, способные запасать энергию: индуктивность и емкость, являются основной причиной возникновения переходных процессов.

Переходный режим, по своей сути – процесс перехода энергетического состояния сети от до коммутационного режима к после коммутационному.

Каждому установившемуся состоянию энергосистемы, в которой имеются реактивные составляющие, соответствует некоторый запас энергии магнитного и электрического полей. Переход от одного установившегося режима к другому связан с увеличением или уменьшением энергии электрического или магнитного полей и сопровождается переходным процессом. Когда изменение запаса энергии прекращается, переходный процесс заканчивается. Если энергетическое состояние цепи не изменяется при коммутации, переходные процессы не возникают.

Энергия, которая накапливается в магнитном поле катушки с индуктивностью L , при протекании через нее тока i_L , выражается формулой:

$$W_L = 1/2 \cdot (L \cdot i_L^2)$$

Количество энергии, которая накапливается в электрическом поле конденсатора емкостью C , заряженного до напряжения u_C , равна:

$$W_C = 1/2 \cdot (C \cdot u_C^2)$$

Магнитной энергия W_L определяется током в катушке i_L , а электрическая W_C – напряжением на конденсаторе u_C , поэтому при коммутациях, независимо от их вида соблюдаются два основных положения: ток катушки и напряжение на конденсаторе не могут изменяться скачком [3]. В обобщенном виде данные положения формируются следующим образом: потокосцепление катушки и заряд конденсатора могут изменяться только плавно, без скачков [4].

Так переходные процессы сопровождаются перераспределением и обменом энергии между электрическими полями и магнитными. Стоит отметить, что между реактивными сопротивлениями элементов сети, которые находятся вблизи к месту возмущения, этот обмен протекает наиболее интенсивно. Как правило, процесс имеет колебательный характер и может сопровождаться повышениями напряжения, опасными для изоляции оборудования, и бросками тока, увеличивающими электродинамические усилия на токоведущие элементы. [5]

Перенапряжение – любое превышение амплитуды наибольшего рабочего напряжения мгновенным значением напряжения (рисунок 1.1).

Кратность – одна из важных характеристик перенапряжений, представляет собой отношение максимального значения напряжения U_{max} к амплитуде наибольшего рабочего напряжения на данной изоляционной конструкции $\sqrt{2}U_{нр}$.

$$K = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}U_{нр}}$$



Рисунок 1.1 – Перенапряжения при коммутации в электрической сети

Перенапряжения при коммутации электрической сети могут иметь большую кратность и имеют пагубное влияние на изоляцию электрооборудования. Также необходимо обратить внимание на то, что путем многократного воздействия перенапряжения небольшой кратности тоже имеют разрушающее воздействие на изоляцию. Существенно снижаемая электрическая прочность изоляции с каждым воздействием перенапряжений существенно увеличивает вероятность повреждения ее при следующих коммутациях с подобными перенапряжениями [6].

При включении трансформатора, конденсаторной батареи и другой реактивной нагрузки могут возникать броски токов, которые вызывают большие электродинамические усилия на токоведущие элементы, что влечёт за собой уменьшение ресурса оборудования, так же они требуют более грубой релейной защиты, тем самым снижая коэффициент чувствительности срабатывания защиты.

1.2 Ограничение параметров переходных процессов в нормальных условиях работы электрической сети

В нормальном режиме параметры электрической системы близки к номинальным. Для этого режима характерно плавное регулирование работы

электростанций, минимальные потери электрической энергии в сетях, удобство осуществления оперативных переключений. Надежное энергоснабжение потребителей без перебоев, с достаточным уровнем напряжения обеспечивается при нормальном режиме электрической сети.

При нормальных условиях возможны следующие коммутации, которые сопровождаются переходными процессами:

- включение/отключение конденсаторов
- включение/отключение шунтирующих реакторов
- включение/отключение трансформаторов
- изменение нагрузки

Некоторые из них могут привести к аварийным ситуациям. Например, включение шунтирующих конденсаторов или шунтирующих реакторов, а также мощных трансформаторов может сопровождаться посадкой напряжения, большими бросками токов или большими перенапряжениями. Отключение шунтирующих реакторов может повлечь за собой повторные зажигания, которые могут привести к возникновению волн напряжения [7].

1.3 Ограничение параметров переходных процессов в аварийных условиях работы электрической сети

Если в электрической системе, при переходе из одного установившегося состояния в другое, отмечается резкое изменение параметров сети (тока и напряжения), то режим становится аварийным.

К аварийным режимам работы электрических сетей относятся следующие отклонения в работе:

- Короткое замыкание
- Перегрузка электросети.
- Кратковременное превышение напряжения.
- Разрыв цепи.

- Скачки напряжения, возникающие вследствие ударов молнии.

Особенно опасны переходные процессы в аварийном режиме работы электрической сети.

Аварийные режимы, вызванные короткими замыканиями, являются наиболее распространенными из всего многообразия электромагнитных переходных процессов.

Большая часть коротких замыканий – дуговые, они часто являются самоликвидирующимися; металлические замыкания реже происходят, они вызваны соединением между собой фаз электроустановки или соединением фаз с землей.

Последствия коротких замыканий:

- резкое увеличение токов в ветвях системы, особенно в месте короткого замыкания;

- значительное снижение напряжения в узлах электрической системы; при трехфазном коротком замыкании ($K^{(3)}$) напряжение в точке короткого замыкания убывает до нуля; несимметричные КЗ (двухфазное – $K^{(2)}$, однофазное – $K^{(1)}$, двухфазное на землю – $K^{(1.1)}$) характеризуются частичным сохранением напряжения в точке КЗ;

- искажение симметрии токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях, в результате чего электростатическое и электромагнитное влияние ЛЭП на линии связи и другие объекты увеличивается;

- тепловое действие токов короткого замыкания, приводящее к повреждению изоляции, спеканию контактов электроаппаратуры и т.д.;

- динамическое действие токов короткого замыкания, появление механических усилий, способных повредить конструкции машин и аппаратов.

К снижению напряжения в ЭС очень чувствительны потребители (нагрузка). при снижении напряжения затормаживаются асинхронные двигатели (АД), которые составляют около 50 % нагрузки, затормаживаются, это приводит к увеличению тока нагрузки и последующему уменьшению напряжения на зажимах нагрузки. От чего возможно нарушение устойчивой параллельной работы электрических машин (ЭМ) в системе, что может привести к распаду системы на отдельные части, которые работают несинхронно. Вследствие чего произойдет продолжительное нарушение электроснабжения потребителей, способное привести к существенному материальному ущербу [1, 9, 10].

В данной работе рассматриваются распределительные сети среднего напряжения. Согласно «Правилам устройства электроустановок» в Российских электрических сетях 6–35 кВ разрешены к применению три режима заземления нейтрали. Пункт 1.2.16 ПУЭ, введенных в действие с 1 января 2003 г. гласит: «...работа электрических сетей напряжением 3–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор» [8]. В настоящее время в России, примерно в 80 % сетей 6–35 кВ используется режим изолированной нейтрали и примерно 20 % – режим заземления через дугогасящий реактор.

Для сетей с изолированной нейтралью режим однофазного короткого замыкания не является аварийным, так как ток КЗ на землю в сети с изолированной нейтралью во много раз меньше, чем ток междуфазных КЗ, поэтому при таком режиме сеть может эксплуатироваться несколько часов.

Таким образом для сетей 10 кВ аварийными режимами являются только междуфазные короткие замыкания:

- Двухфазное КЗ
- Трехфазное КЗ

1.4 Направления исследований по разработке эффективных средств ограничения параметров коммутационных переходных процессов в электрических сетях

Максимальный уровень токов КЗ для распределительных сетей 6 — 10 кВ ограничивается техническими параметрами токопроводов, электрических аппаратов, устойчивостью двигательной нагрузки и термической стойкостью кабелей.

На сегодняшний день существует много несколько способов ограничения токов короткого замыкания таких как:

- Повышение напряжения питающих сетей.
- Уменьшение числа ступеней трансформации напряжения.
- Секционирование сборных шин при разомкнутых секционных выключателях.
- Применение трансформаторов с расщепленными обмотками и секционных реакторов.
- Применение линейных реакторов
- Предвключаемые резисторы
- Демпфирующие реакторы или резисторы, а также разрядники
- Усиление изоляции системы и оборудования для выдерживания более высоких токов.
- Тиристорные ТОУ

Если сопутствующие затраты на ограничители токов КЗ или меры по ограничению токов КЗ окупаются благодаря возможности использования более дешевых коммутационных устройств и токоведущих частей, при этом повышается надежность электроснабжения потребителей, то использование таких мер считается экономически выгодным.

Наиболее распространенные и действенные из них: Секционирование сборных шин при разомкнутых секционных выключателях; применение

трансформаторов с расщепленными обмотками низшего напряжения и использование токоограничивающих реакторов.

Секционирование электрических сетей – эффективное средство, которое позволяет уменьшить уровни токов короткого замыкания в электрических сетях в 1,5 - 2 раза.

Для ограничения токов КЗ. в мощных электроустановках используются реакторы, также при повреждениях за реакторами они позволяют поддерживать напряжения на шинах на определенном уровне. [2, 11].

Соответствующее построение схем электростанций и сетей

Соответствующее построение схем электростанций и сетей, также позволяет ограничить токи КЗ. Так повышение класса напряжения сети приводит к уменьшению рабочих токов и, следовательно, токов КЗ; параллельная работа источников исключается за счет секционирования электрических сетей, что приводит к уменьшению токов КЗ (но при этом возможно увеличение потерь в ЛЭП и силовых трансформаторах при нормальном режиме работы); раздельная работа трансформаторов на шинах низшего напряжения подстанций, а также в системе собственных нужд электростанций и ПС увеличивает сопротивление цепи КЗ и снижает токи КЗ; так как сопротивление трансформаторов с расщепленной обмоткой в режиме КЗ почти в 2 раза больше, чем у трансформаторов с теми же номинальными параметрами без расщепления обмотки НН, применение таких трансформаторов также ограничивает токи КЗ [12].

Использование предвключаемых резисторов в качестве ограничения коммутационных переходных процессов

Фирмой АВВ в настоящее время промышленно выпускаются выключатели, которые оборудованы предвключаемыми резисторами. При использовании предвключаемых резисторов увеличивается отношение $R_{\text{ЭКВ}}/X_{\text{ЭКВ}}$, и, как следствие способствует уменьшению амплитуды и длительности апериодической составляющей тока, протекающего через выключатель. При включении таких резисторов за определенное время перед замыканием основных контактов выключателя замыкаются вспомогательные контакты, включенные последовательно с активным сопротивлением (рисунок 1.2). За счет этого в первый момент времени после замыкания контактов осуществляется интенсивное демпфирование электромагнитного переходного процесса.

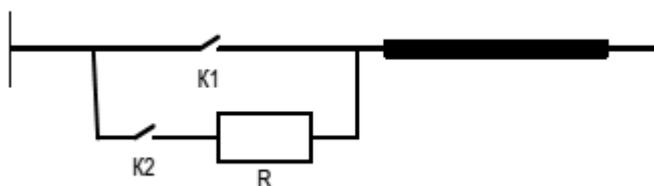


Рисунок 1.2 – Схема включения предвключаемых резисторов

Применяемое в современных выключателях время предвключения резисторов варьируется в пределах 8-12 мс.

Использование на линиях электропередачи выключателей с предвключаемыми резисторами не гарантирует надежного погасания дуги в выключателе при быстрой его коммутации (включении/отключении). Это связано с тем, что не смотря на то, что на первом этапе коммутации (включение вспомогательных контактов) и происходит быстрое затухание апериодической составляющей тока, на втором этапе включения (включение главных контактов, шунтирующих резисторы) также возникает апериодическая составляющая в токе (хотя с меньшим начальным значением, но достаточно опасная). Поэтому применение только этой меры не

гарантирует надежного погасания дуги в выключателе при быстром включении/отключении [13].

Использование компенсационных реакторов в качестве ограничения коммутационных переходных процессов

При включении компенсационного (нулевого) реактора с индуктивным сопротивлением x_N в цепь заземления нейтрали трёхфазной группы шунтирующих реакторов, соединённых по схеме «звезда», имеющих фазное сопротивление x_P , группа реакторов эквивалентна трём индуктивным сопротивлениям $x_{P,0}$, включенным между фазами и землёй, и трём индуктивным междуфазным сопротивлениям $x_{P,Ф,Ф}$, соединенным в треугольник, причем

$$x_{P,0} = x_P + 3x_N, \quad x_{P,Ф,Ф} = x(3 + x_P / x_N).$$

При установке двух четырёхлучевых групп реакторов на линии их индуктивные сопротивления $x_{P,0}$ компенсируют приходящиеся на них половины емкостных проводимостей линии на землю $B_0/2$, а индуктивные сопротивления $x_{P,Ф,Ф}$ – половины междуфазных емкостных проводимостей $B_m/2$

Условием компенсации междуфазных емкостных ВЛ является равенство междуфазной реактивной проводимости группы реакторов

$$Y_{Ф,Ф} = \frac{1}{x_{P,Ф,Ф}} \text{ и } 0,5B_m$$

$$\frac{1}{x(3 + x_P / x_N)} = 0,5B_m$$

из которого следует расчетное выражение для определения необходимого индуктивного сопротивления нулевого реактора:

$$x_N = \frac{x_P}{\frac{2}{B_m x_P} - 3} = 0,5$$

Окончательный выбор используемого сопротивления компенсационного (нулевого) реактора выполняется по данным пусковых испытаний ВЛ [13].

Тиристорные ТОУ

Тиристорное токоограничивающее устройство шунтового типа (ТОУ) предназначено для промышленных и городских распределительных подстанций среднего класса напряжения 6-10 кВ. ТОУ предназначено для повышения коммутационной способности электромеханических выключателей, установленных на подстанциях (вакуумных, масляных, элегазовых и других) при несоответствии коммутационной способности этих выключателей и реальной мощности тока короткого замыкания (КЗ). Одновременно ТОУ снижает динамическое и термическое воздействие на кабельную сеть 6-10 кВ, снижая ударную волну тока КЗ. Коммутационная способность защищаемых выключателей увеличивается не менее чем в три раза.

Принцип действия ТОУ заключается в следующем. При возникновении контура короткого замыкания на одном из отходящих фидеров подстанции, ток КЗ от системы электроснабжения и электродвигателей подпитки (при их наличии) поступает через выключатель неисправного присоединения к точке КЗ. Величина тока КЗ ограничивается мощностью системы электроснабжения, реактивностью понизительного трансформатора, реактора (при его наличии) и сопротивлением кабеля до точки КЗ.

При возникновении КЗ, через все элементы схемы электроснабжения распространяется апериодическая ударная волна тока КЗ, которая в предельных случаях может достигать значения 2,55 от установившегося значения тока КЗ. Если в нагрузке на других фидерах имеются электродвигатели, то они обеспечивают дополнительную подпитку точки КЗ, величина которой зависит от установленной мощности электродвигателей и их типа.

Кабельные сети 6/10 кВ при КЗ также подвергаются дополнительному термическому и динамическому воздействию, особенно места муфтовых соединений, что снижает их эксплуатационную надежность. Установка ТОУ на подстанции существенным образом изменяет характер процесса аварийного тока КЗ неисправного присоединения.

ТОУ представляет собой мощный бесконтактный коммутатор переменного тока, последовательно с которым установлен активный резистор. Величина резистора определяется мощностью питающего трансформатора и степенью токоограничения. ТОУ подключается параллельно каждой секции сборных шин 6-10 кВ на подстанции.

Включение ТОУ во время существования аварийного режима КЗ образует искусственный контур короткого замыкания, подключенный параллельно реальному контуру КЗ. При этом происходит перераспределение тока КЗ от питающего трансформатора между контуром реального КЗ и контуром включенного ТОУ. Характер токоперераспределения зависит от точки удаления реального КЗ от секции сборных шин подстанции. Образование с помощью ТОУ контура искусственного КЗ, параллельного контуру естественного КЗ, существенно влияет на величину ударной волны тока КЗ. На приведенных ниже осциллограммах работы ТОУ в условиях реального КЗ видно, что апериодическая составляющая ударной волны тока даже ниже установившегося значения тока КЗ. Система токоограничения на основе ТОУ увеличивает коммутационную способность фидерных выключателей не менее чем в три раза [14].

На рисунке 1.3 показаны осциллограммы, снятые при натурных испытаниях одного из устройств ТОУ, установленного на распределительной ПС с трансформаторами мощностью 40 МВА. Место короткого замыкания находилось прямо на выходных шинах одного из резервных масляных выключателей. На осциллограммах можно отчетливо видеть процесс снятия ударной волны тока КЗ с аварийного присоединения.

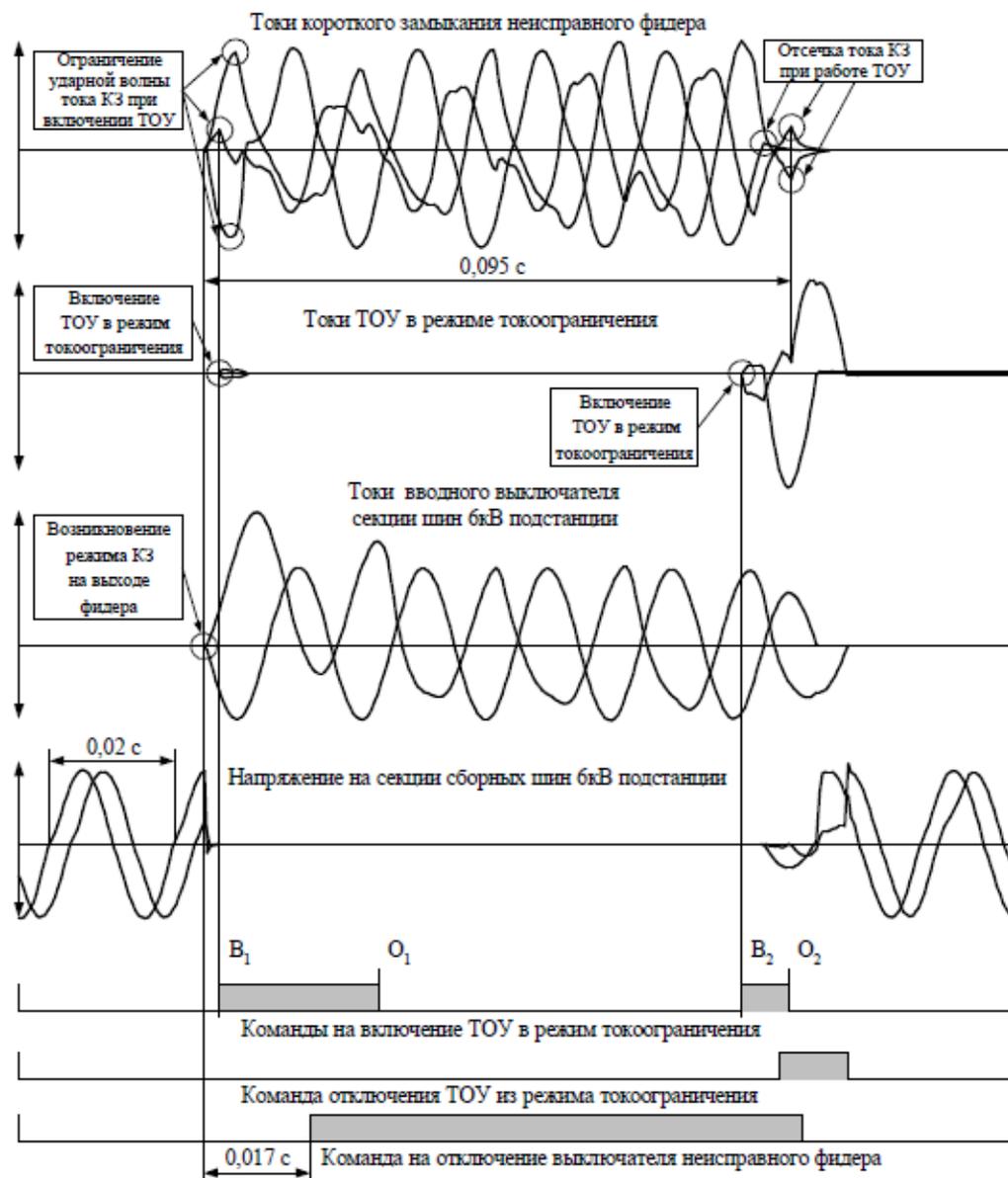


Рисунок 1.3 – Эпюры осциллограмм при работе ТОУ в режиме токоограничения и коротком замыкании вблизи секции сборных шин подстанции

Технические характеристики ТОУ представлены в таблице 1.1:

Таблица 1.1 - Технические характеристики ТОУ

Номинальное напряжение, кВ	6
Мощность питающего трансформатора, кВА, до	63 000
Ток динамической устойчивости, длительностью 0,02 с, кА, не менее	60
Срок службы,	10 лет
Условия эксплуатации: закрытые отапливаемые помещения с температурой, °С	от 0 до + 40
Число включений	10 000
Охлаждение - естественное, воздушное	

Микроконтроллерная система управления ТОУ выполняет следующие функции:

- автоматическое включение ТОУ спустя 0,02 секунды после возникновения короткого замыкания на одном из присоединений подстанции;
- автоматическая подача команды на отключение выключателя неисправного присоединения после включения ТОУ;
- автоматическое отключение ТОУ после ликвидации аварийного режима короткого замыкания.

В основе направления исследования коммутационных переходных процессов в электрических сетях, лежат практические исследования свойств коммутационных устройств, а также теоретические обоснования этих исследований. В настоящее время актуальность приобретают вакуумные коммутационные аппараты, в опытах Российских и зарубежных исследований используются экспериментальные образцы быстродействующего управляемого выключателя, а также быстродействующего коммутирующего устройства на основе РВУ.

Исследования коммутационных характеристик БУВВ Российских ученых показывают, что при подключении реактивной нагрузки (конденсаторной батареи и воздушного реактора) продемонстрировали правильность принятых технических решений. При подключении конденсаторной батареи выключатель обеспечивал требуемую точность включения $\Delta t < 0,1$ мс относительно нуля напряжения. После нуля тока сдвиг фазы последующего включения РВУ не превышал 1 мс. В этом случае относительные броски тока не превышали ток, установившийся в конденсаторе после его подключения.

1.5 Возможность применения вакуумных коммутационных аппаратов в качестве ТОУ

Эффективным способом ограничения токов короткого замыкания (КЗ) является кратковременное шунтирование точек КЗ на отходящих фидерах с помощью поперечно включаемых (шунтирующих) коммутационных устройств, присоединённых к шинам подстанций. В России этот способ находится в начальной стадии развития. К практическим выходам можно отнести лишь результаты исследований Института энергетической электроники РАН, в котором разработаны и выпускаются, в индивидуальном порядке, тиристорные токоограничивающие устройства (ТОУ) напряжением 6-10 кВ. Вакуумные выключатели в этих устройствах используются в качестве защитных (дублирующих) устройств.

Вместе с тем вакуумные выключатели напряжением 6, 10, 20, 35 кВ, серийно выпускаемые промышленными предприятиями электротехнической отрасли, по основным техническим и эксплуатационным показателям вполне конкурентоспособны с тиристорными ТОУ. Преимуществами вакуумных выключателей являются: более широкая номенклатура изделий, серийность производства, пониженные расчётные затраты, большая практика эксплуатации в электрических сетях.

Возможности использования вакуумных выключателей в качестве коммутационных аппаратов в составе шунтирующих ТОО частично могут быть оценены на основе анализа соответствия их технических характеристик условиям решаемой задачи. Как известно, время включения-отключения таких выключателей с учётом работы приводов составляет десятки миллисекунд, а замыкание-размыкание их контактов осуществляется за доли миллисекунды. Разброс по времени работы приводов вакуумных выключателей не превышает двух миллисекунд, что позволяет выбирать и реализовывать оптимальные моменты для проведения этих коммутаций. Отключающая способность выключателей по току короткого замыкания соответствует токам КЗ подавляющего большинства электрических подстанций среднего напряжения. Их номинальное напряжение в ближайшей перспективе будет поднято до 110 кВ.

Некоторым ограничением является ресурс работы выключателей, используемых на мощных электрических подстанциях, где токи КЗ близки к их отключающей способности. Однако и в этих условиях выключатели выдерживают до капитального ремонта 40-50 циклов «отключение-включение», что является приемлемым для многих случаев практического применения этих выключателей в составе ТОО шунтирующего типа. При этом следует учитывать, что при организации синхронных циклов «отключение-включение» ресурс выключателей в составе ТОО шунтирующего типа, может быть кратно увеличен. Относительно линейных выключателей ожидается, что их ресурс возрастет за счёт значительного ограничения отключаемых токов КЗ [15].

1.6 Процессы при работе вакуумных коммутационных аппаратов

Современные тенденции применения выключателей в распределительных сетях 6 (10) кВ

Вакуум является идеальной изоляционной средой, так как вероятность ионизации молекул газа путём соударения с ними электронов чрезвычайно мала. Однако опыт показывает [16], что при достаточно большой напряжённости электрического поля $10 - 10^3$ В/см даже в самом совершенном техническом вакууме появляется электрический ток, который быстро возрастает при дальнейшем увеличении напряжённости поля вплоть до пробоя.

Вакуумные коммутационные устройства способны вызывать значительные перенапряжения при отключении индуктивных нагрузок (ненагруженные трансформаторы, электродвигатели в режиме пуска). В силу особых свойств вакуума эти перенапряжения по своему характеру могут отличаться от перенапряжений, создаваемых в тех же условиях коммутационными аппаратами, в которых используется другая дугогасительная среда (воздух, элегаз или масло). При коммутации электрической сети вакуумными выключателями возникают следующие явления: предварительные пробои при включении, срез тока при отключении, повторные зажигания дуги при отключении и виртуальный срез тока. Кроме того на величину перенапряжений и бросков тока оказывает влияние неодновременность срабатывания полюсов аппарата. Срез тока при отключении представляет собой наиболее известное и наиболее распространенное явление, которое встречается во всех типах выключателей. Под срезом тока понимается преждевременное прерывание переменного тока перед его естественным переходом через нулевое значение [17, 18].

Механизм развития перенапряжений от среза тока заключается в следующем: При протекании тока в индуктивной нагрузке образуется запас электромагнитной энергии. Разрыв контура, содержащего индуктивность, при

значении тока, отличного от нулевого значения, сопровождается преобразованием этой энергии в другие виды энергии, в частности, энергию электрического поля [19]. В результате происходит повышение напряжения со стороны нагрузки, характерный процесс изменения которого представлен на рисунке 1.4.

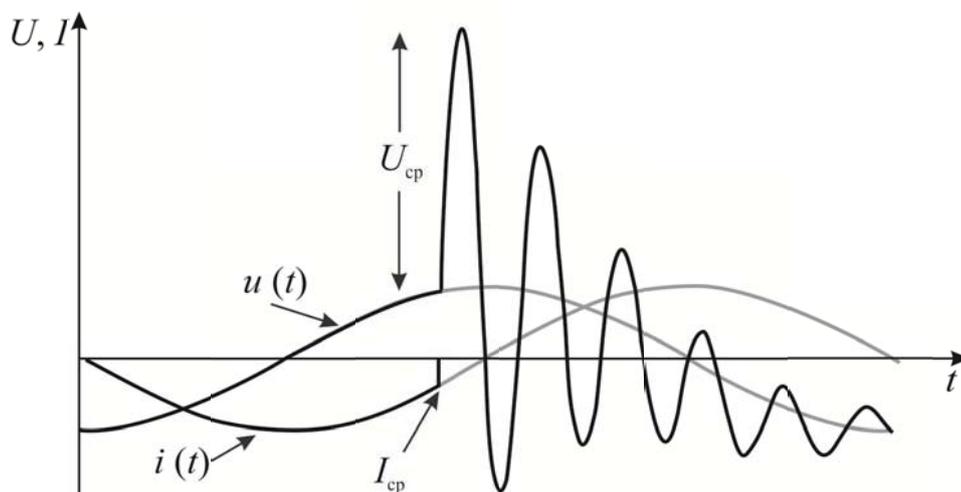


Рисунок 1.4 – Коммутационные перенапряжения, вызванные срезом тока: $U_{ср}$ – перенапряжение, вызванное срезом тока; $I_{ср}$ – срез тока

При отключении переменного тока вакуумными выключателями, если момент начала разведения контактов не совпадает с нулем тока промышленной частоты, между контактами выключателя зажигается дуга. Дуга горит в парах металла контактов. Концентрация паров металла случайна и снижается при подходе тока к нулевому значению. Незадолго до достижения нуля тока, концентрация пара становится недостаточной для поддержания горения дуги, и дуга гаснет. Этот процесс зависит, в основном, от природы контактного материала. [19, 20]

Таким образом, наличие срезов токов в вакуумных выключателях представляют собой практически мгновенный ($10^{-7} - 10^{-8}$ с) [18]. обрыв малого тока до перехода через нулевое значение, в следствии неустойчивости дуги в среде вакуума. Данное поведение вакуумного выключателя позволяет

представить его как модель идеального ключа, мгновенно переходящего из проводящего состояния в непроводящее.

Предварительные пробой при включении и повторные зажигание дуги при отключении представляют собой процесс зажигания электрической дуги между контактами выключателя в случае, когда приложенное напряжение превышает электрическую прочность межконтактного промежутка (рисунок 1.5.2) [17].

Таким образом, систематически можно наблюдать предварительные пробой при включении в конце процесса включения. Скорость сближения контактов и величина напряжения, которое приложено в момент сближения контактов влияет на время возникновения предварительных пробоев. При отключении повторные зажигание дуги возникают в начале процесса отключения в случае, когда время горения дуги мало.

В этом случае промежуток между контактами выключателя недостаточный для выдержки восстанавливающегося напряжение, благодаря чему и происходит повторный пробой диэлектрика.

Тогда промежуток между контактами выключателя недостаточен для выдерживания восстанавливающегося напряжения, из-за чего и происходит повторный пробой диэлектрика.

При предварительном пробое или повторном зажигании дуги колебательный разряд сосредоточенных емкостей вызывает ток высокой частоты (104 – 105 Гц []), проходящий между контактами выключателя, с наложением на ток промышленной частоты (рисунок 1.5). Эти явления неизбежны и характерны для всех типов выключателей. Особенностью вакуумных выключателей является их наиболее высокая дугогасящая способность и возможность отключать высокочастотные токи, имеющие очень высокую скорость перехода через ноль. Вследствие этого вакуумные

коммутационные аппараты дают большее число зажиганий электрической дуги по сравнению с другими типами выключателей.

Многократные зажигания электрической дуги в зависимости от расстояния между контактами изменяются следующим образом:

- при включении амплитуда перенапряжений уменьшается до смыкания контактов;
- при отключении амплитуда перенапряжений возрастает (эскалация напряжения) до тех пор, пока электрическая прочность между контактами выключателя не станет напряжением [21]

При протекании тока в индуктивной нагрузке образуется запас электромагнитной энергии достаточной, чтобы выдерживать восстанавливающееся напряжение.

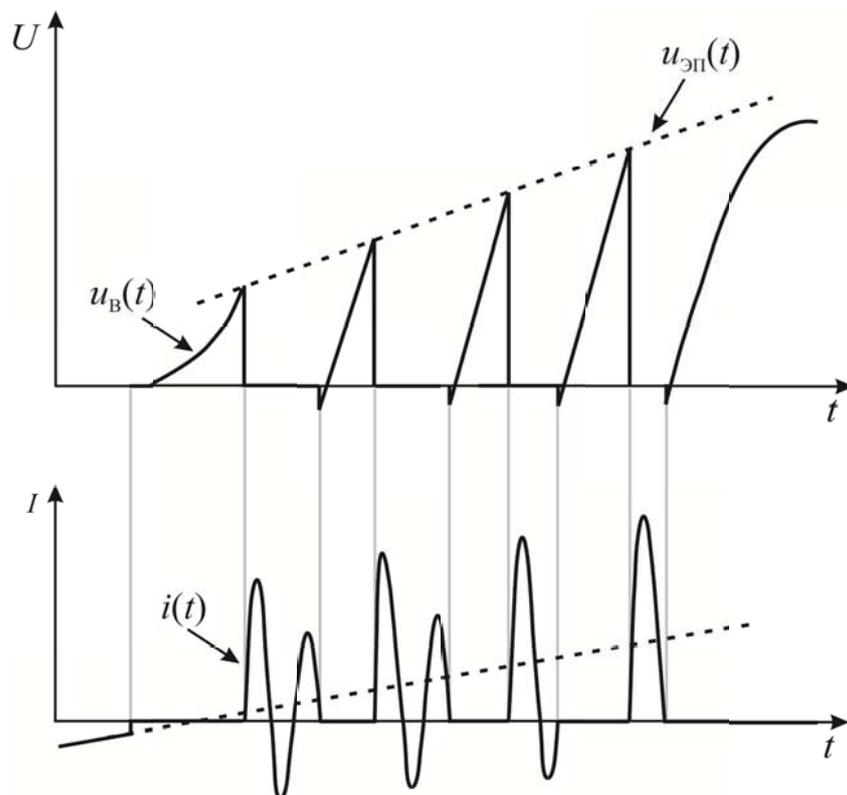


Рисунок 1.5 – Процесс зажигания электрической дуги между контактами выключателя: $u_B(t)$ – восстанавливающееся напряжение между контактами; $u_{ЭП}(t)$ – электрическая прочность межконтактного промежутка; i

(t) – высокочастотный ток в электрической дуге.

Явления многократных зажиганий электрической дуги сопровождается перенапряжениями с крутым фронтом, что представляет опасность, прежде всего для витковой изоляции электрооборудования.

Виртуальный срез тока может возникать в особых конфигурациях электрических сетей, характеризующихся сильными емкостно-индуктивными связями между фазами. Суть явления состоит в следующем. При отключении электрической сети повторные зажигания дуги в первом нашем плесе вакуумного выключателя вызывают заметные колебания высокочастотного тока не только в данной фазе, но также и в соседних фазах, по которым в этот момент времени может проходить ток довольно высокой величины. Если индуктивный высокочастотный ток в соседней фазе достигнет амплитуды того же порядка, что и ток промышленной частоты, то возникнет ноль тока («искусственный», но реальный, а не виртуальный). Выключатель в этот момент времени может отключить ток до его прохождения через естественный ноль. В подобных случаях значение тока обрыва вычисляется в десятках, даже в сотнях ампер, а связанные с током перенапряжения имеют очень высокую кратность [18, 19].

Оптимальным решением вопроса снижения перенапряжений в данном случае является сдвиг момента времени отключения одного из полюсов выключателя таким образом, чтобы в течение временного интервала, когда могут происходить многократные повторные зажигания дуги, две другие фазы оставались еще включенными и, соответственно, нечувствительными к наведенным помехам.

Неодновременность срабатывания полюсов аппарата в процессе коммутации вызывает кратковременный неполнофазный режим, во время которого могут происходить перенапряжения высокой кратности. С увеличением неодновременности замыкания контактов перенапряжения увеличиваются [18]. Напротив, коммутация каждой отдельной фазы

выключателя в заранее определенный момент времени позволяет значительно снизить кратность перенапряжений и амплитуду бросков тока [22, 23, 24].

1.7 Управление коммутацией как способ ограничения параметров переходных процессов в электрических сетях

Коммутация цепей, в которых имеется реактивная нагрузка, в произвольные моменты времени иногда приводит к появлению больших перенапряжений или к скачкам тока. Переходные процессы влекут за собой большие электрические и механические нагрузки на электрооборудование и способствуют постепенному или мгновенному повреждению аппаратов и их изоляции [25, 26].

Амплитудные значения перенапряжений и скачков тока переходных процессов зависит от момента на синусоидах токов или напряжений, в который происходит размыкание/замыкание контактов вакуумных выключателей. Рано или поздно коммутация может произойти в наихудшей для этого точке кривой [27].

Даже в выключателях, имеющих очень низкую вероятность повторных пробоев, при частой коммутации при оперировании большими емкостными нагрузками или фильтрами подавления гармоник могут возникать случайные повторные пробой. Управляемые операции включения/отключения позволяет снизить риск возникновения случайного пробоя до нуля.

Управляемая (синхронная) коммутация – коммутация электросети в определенный момент времени, которая учитывая состояние сети, позволяет производить замыкание или размыкание контактов заданной фазе тока/напряжения в наиболее благоприятных условиях для электрооборудования.

Применение управляемой коммутации позволяет предотвратить появление опасных перенапряжений и бросков тока, тем самым увеличивая коммутационный ресурс оборудования.

Успешное решение проблемы возникновения опасных перенапряжений и бросков тока – применение вакуумного выключателя с управляемой коммутацией.

В нормальных режимах управляемое включение вакуумного выключателя на реактивную нагрузку позволяет существенно уменьшить скачки тока, а управляемое отключение снижает вероятность возникновения повторных пробоев и, как следствие, возникновения перенапряжений. Например, оптимальным моментом для включения конденсаторной батареи является момент, когда напряжение на разрыве выключателя проходит через ноль [28, 29]. Чем момент включения дальше от момента перехода напряжения через ноль, тем больше броски тока.

Применение управляемой коммутации эффективно как включения конденсаторных батарей, так и для отключения шунтирующих реакторов, трансформаторов и ненагруженных линий. В свою очередь управляемое отключение токов короткого замыкания также позволяет до минимальных значений сократить время горения дуги.

Время, за которое контакты расходятся на расстояние, достаточное для успешного гашения дуги – минимальное время горения дуги, при условии, что момент расхождения контактов совпадает с моментом перехода кривой тока через нулевое значение. Таким образом, управляемое отключение токов КЗ – средство, способствующее уменьшению воздействия негативных факторов, сопровождаемых коммутацией, таких как эрозия контактов вакуумного коммутационного аппарата, и, как следствие, повышению коммутационного ресурса выключателя. Необходимо отметить, что для вакуумного выключателя применение управляемой коммутации может способствовать увеличению отключающей способности

Управляемая коммутация в нормальном режиме работы, при оперировании номинальными токами позволяет также улучшить характеристики выключателя, а именно, способствует повышению его

коммутационного ресурса, количеству включений/отключений. Данное улучшение особо актуально при частых коммутациях выключателя. Также управляемая коммутация в нормальном режиме работы благоприятствует предотвращению виртуальных срезов тока и др. При управляемой коммутации сокращаются коммутационные перенапряжения, и становится возможным увеличение номинального напряжения выключателя.

По стабильности времени включения и времени отключения к управляемым коммутационным аппаратам предъявляются очень жесткие требования: возможен разброс времени не более $\pm (1-2)$ мс.

На сегодняшний день управляемая коммутация используется в основном в сетях высокого напряжения на элегазовых выключателях

Разработка электромеханических выключателей с разбросом времени включения не более, чем ± 1 мс, и повышенной электрической прочностью сталкивается с рядом существенных трудностей. Следует также учитывать, что закономерности пробоя межконтактного зазора характеризуются большими статистическими разбросами. Существенно уменьшить разброс времени включения относительно заданной фазы напряжения можно путем использования гибридных устройств управляемой коммутации, содержащих мощные диоды и механические коммутационные аппараты [30]. В таких устройствах операции включения и отключения осуществляются в диодном блоке при смене полярности напряжения. Механические аппараты обеспечивают длительное пропускание тока после включения устройства без существенных энергетических потерь и требуемую электрическую прочность после отключения тока. Однако область применения таких устройств ограничена коммутацией конденсаторных батарей, оптимальный момент включения которой (нулевое падение напряжения на коммутаторе) при правильном выборе схемы реализуется автоматически.

Наиболее перспективным способом управляемой коммутации, который в полной мере удовлетворяет изложенным выше требованиям,

является использование новых типов вакуумных коммутационных устройств - управляемых вакуумных разрядников (РВУ). Их комбинация с вакуумными выключателями позволит свести процесс включения коммутирующего устройства к быстрому включению РВУ в заданной фазе питающего напряжения (погрешность менее $\pm 0,1$ мс) с последующим замыканием контактов выключателя [31]. Новый тип быстродействующего управляемого вакуумного выключателя (БУВВ) содержит в каждом полюсе параллельно соединенные вакуумные дугогасительные камеры (ВДК) и быстродействующее коммутирующее устройство на основе РВУ с блоком запуска.

По сравнению с известными схемами коммутаторов на основе тиристорных вентилей предложенная схема отличается более простой конструкцией, высоким уровнем выдерживаемых напряжений, высокой коммутирующей способностью по току, высокой стойкостью к аварийным перегрузкам, а, следовательно, и надежностью, и сравнительно низкой стоимостью. По сравнению с выключателями с управляемой пофазной коммутацией предложенная схема отличается более высокой точностью и стабильностью включения в заданной фазе сетевого напряжения. По сравнению с гибридным коммутатором может использоваться в сетях на более высокий класс напряжения до 110 кВ, и обладает большими функциональными возможностями, например, может использоваться для подключения реакторов и трансформаторов.

1.8 Выводы по главе

Приведенный в литературном обзоре анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Коммутации в электрических сетях приводят к возникновению переходного процесса, который может сопровождаться значительными перенапряжениями и бросками тока, что приводит к уменьшению ресурса электрооборудования.

2. Короткие замыкания – часто происходящие аварийные режимы, имеющие пагубное влияние на оборудование. Имеют тенденцию к увеличению в связи с ежегодным увеличением нагрузки.

3. Имеющиеся средства ограничения ткз в сетях 6-10 кВ не достаточно эффективны. Эффективным способом ограничения токов короткого замыкания (КЗ) является кратковременное шунтирование точек КЗ на отходящих фидерах с помощью поперечно включаемых (шунтирующих) коммутационных устройств, присоединённых к шинам подстанций.

4. По основным техническим и эксплуатационным показателям вакуумные выключатели вполне конкурентоспособны с тиристорными ТОУ. Однако коммутации вакуумными выключателями индуктивных элементов электрической сети сопровождаются повторными зажиганиями дуги и высокочастотными перенапряжениями.

5. При коммутации электрической сети вакуумными выключателями возникают явления, оказывающие влияние на величину перенапряжения, такие как срез тока при отключении, предварительные пробой при включении, повторные зажигания дуги при отключении и виртуальный срез тока. Кроме того, на величине перенапряжения и броска тока сказывается неодновременность срабатывания полюсов аппарата. Поэтому желательно применение управляемой коммутации.

Глава 2 Подготовка моделирующего комплекса и программа исследований ограничения токов короткого замыкания в ЭС

Для осуществления поставленной задачи выбран программный комплекс MATLAB Simulink. Название программы – сокращение от английского «Matrix Laboratory» (Матричная Лаборатория), в русском языке произносится как Матлэб.

MATLAB — это интерактивная среда и высокоуровневый язык для программирования, выполнения численных расчетов и визуализации результатов. MATLAB позволяет производить анализ данных, создавать алгоритмы, разрабатывать модели и приложения.

Пакет используют более миллиона учёных и инженеров, он совместим с большинством современных операционных систем, в том числе Linux, Mac OS, Solaris.

MATLAB – основа всего семейства продуктов MathWorks, является главным инструментом для решения широкого спектра прикладных и научных задач, в таких областях как: моделирование объектов и разработка систем управления, проектирование коммуникационных систем, обработка сигналов и изображений, измерение сигналов и тестирование, финансовое моделирование, вычислительная биология и др.

MATLAB широко применяется в следующих областях:

- обработка сигналов и связь,
- обработка сигналов и изображений,
- моделирование объектов и разработка систем управления,
- автоматизация тестирования и измерений,
- финансовый инжиниринг и моделирование,
- проектирование коммуникационных систем,

- вычислительная биология и др.

Программа Simulink – расширение программного комплекса MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области в которой он работает.

2.1 Модель фрагмента электрической сети для проведения исследований

В качестве модели фрагмента электрической сети для численного моделирования ограничения тока при коротком замыкании использовалась упрощённая схема подстанции 110/10 кВ (Рисунок.2.1).

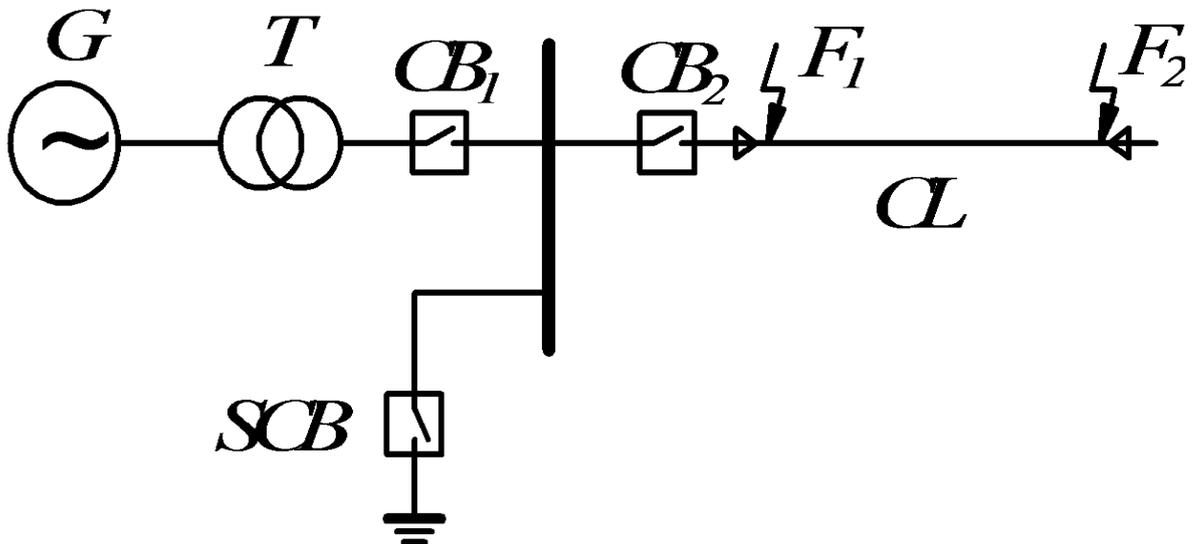


Рисунок 2.1. Электрическая схема для численного моделирования ограничения тока при коротком замыкании.

Здесь: G – эквивалентный генератор энергосистемы, T – силовой трансформатор 110/10. QF1 –линейный выключатель за трансформатором; QF2 –линейный выключатель отходящего фидера; SQF –шунтирующий выключатель; K1 – короткое замыкание в начале кабельной линии; K2 – короткое замыкание в конце кабельной.

Проведена серия расчётов параметров режима при трёхфазных и двухфазных КЗ в начале и конце кабельной линии.

Шунтирующий выключатель в опытах включался через резистор с сопротивлением 0.01 Ом. Сопротивление необходимо для оптимального перераспределения токов кз.

2.2 Модели элементов электрической сети в формате моделирующего комплекса

В формате MATLAB Simulink элементы электрической сети, изображенной на рисунке выше (рис 2.1) представлены следующим образом.

Трёхфазный источник напряжения Three Phase Source

Эквивалентный генератор G представлен в виде блока Three Phase Source – трёхфазный источник напряжения, с помощью которого вырабатывается трёхфазная система напряжений. Three Phase Source представлен на рисунке 2.2., окно задания параметров блока на рисунке 2.3. в данной схеме представляет энергосистему.

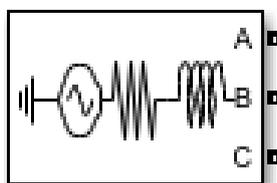


Рисунок 2.2 – Внешний вид блока

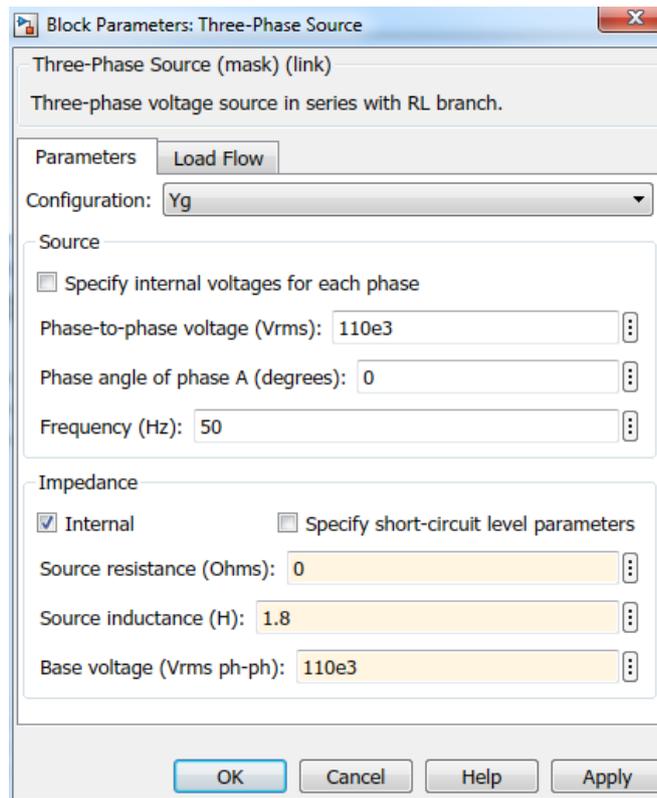


Рисунок 2.3 – Окно задания параметров Three Phase Source

Параметры блока:

Configuration – выбор способа соединения фаз источника. Значение выбирается из предложенного списка:

Y – звезда,

Yn – звезда с нулевым проводом,

Yg – звезда с заземленной нейтралью.

Так как мы моделируем источник напряжением 110 кВ, следовательно, нам необходимо выбрать способ заземления нейтрали, используемый в сетях высокого напряжения – Yg – звезда с заземленной нейтралью.

Phase-to-phase voltage (Vrms) – в этом окне задается действующее значение линейного напряжения. В данной модели принимается 110 кВ;

Phase angle of phase A (degree) – необходимо задать начальную фазу напряжения в фазе А, единицы измерения градусы;

Frequency (Hz) – частота, единицы измерения – Герцы (Гц). Задаем промышленную частоту для сетей РФ, равную 50 Гц;

Окно Specify impedance using short-circuit level – задание собственного полного сопротивления источника используя параметры короткого замыкания. В данной модели не используется.

Source resistance (Ohms) –сопротивление источника собственное, единицы измерения – Омы (Ом), принимаем равным нулю.

Source inductance (H) –индуктивность источника собственная, единицы измерения – Генри (Гн), принимаем равным 1,8 Гн.

Base voltage (Vrms ph-ph) – линейное базовое напряжение, действующее значение. Величина базового линейного напряжения источника, при котором определена мощность короткого замыкания. Для данной модели не задается.

Трехфазный двухобмоточный трансформатор Three-phase Transformer (Two Windings)

Трансформатор Т представлен в виде блока Three-phase Transformer. С его помощью моделируется трехфазный двухобмоточный трансформатор. Модель выполнена на базе трех однофазных трансформаторов. В модели возможен учет нелинейности характеристики намагничивания материала сердечника.

Three-phase Transformer (Two Windings) представлен на рисунке 2.4., окно задания параметров блока на рисунке 2.5.

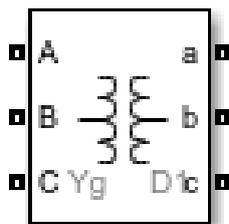


Рисунок 2.4. – Внешний вид блока

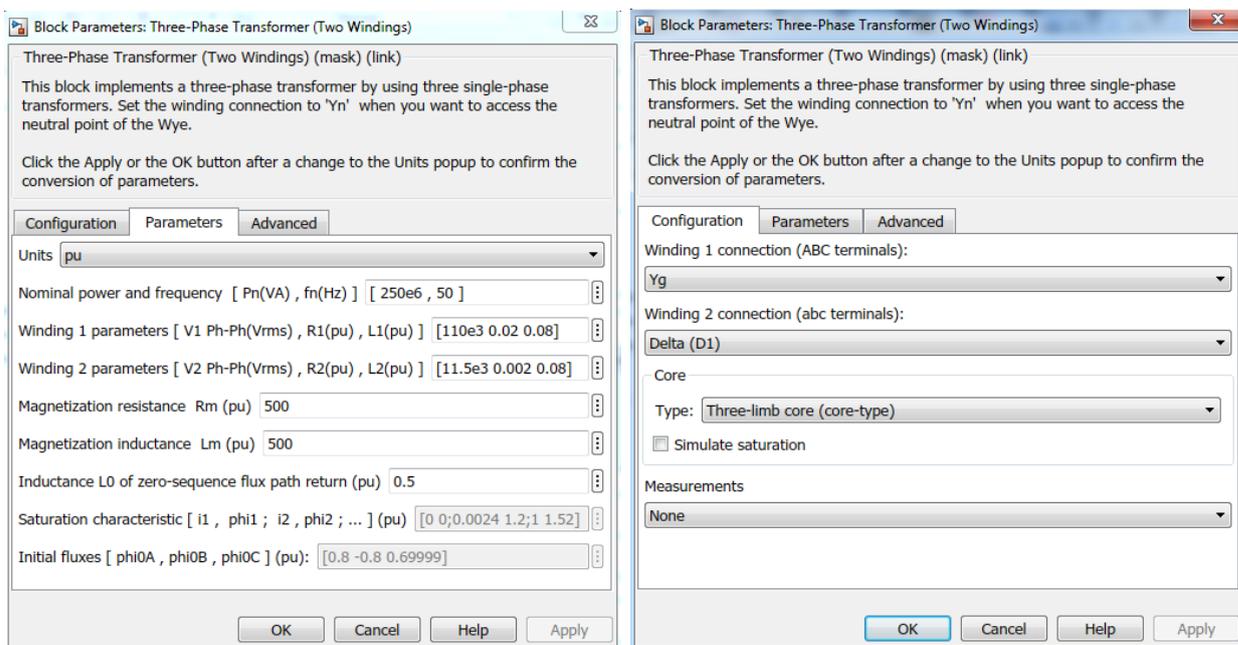


Рисунок 2.5 – Окно задания параметров Three-phase Transformer (Two Windings)

Параметры блока:

Winding 1 (ABC) connection – выбор схемы соединения первичной обмотки.

Winding 2 (abc) connection – – выбор схемы соединения вторичной обмотки.

Значение параметров для первичной и вторичной обмоток выбирается из списка:

- Y - звезда,
- Yn - звезда с нейтралью,
- Yg -звезда с заземленной нейтралью,
- Delta(D1) - треугольник первой группы (сдвиг напряжений в сторону опережения на 30°, по сравнению с соединением в звезду),
- Delta(D11) - треугольник одиннадцатой группы (сдвиг напряжений в сторону отставания на 30°, по сравнению с соединением в звезду).

Так как в качестве высокого напряжения мы принимаем сети 110 Кв, то для первичных обмоток трансформатора выбираем способ соединения Y_g - звезда с заземленной нейтралью, для вторичных обмоток 10 кВ, согласно ПУЭ, выбирается соединение обмоток в треугольник – Delta(D1)

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора.

Winding 1/2 parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] – параметры первичной/вторичной обмотки. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.).

Saturable core – насыщающийся сердечник. При установленном флажке используется нелинейная модель трансформатора.

Magnetization resistance Rm(pu)/inductance Lm(pu) – активное сопротивление/ индуктивность цепи намагничивания (о.е.).

Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2] – характеристика насыщения сердечника. Параметр не используется в данной модели.

Параметры цепи намагничивания, как и сопротивления, и индуктивности обмоток задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора.

Характеристика намагничивания задается аналогично модели нелинейного трансформатора.

Трехфазная последовательная RLC-цепь Three -Phase Series RLC Branch

Для учета сопротивлений линий электропередач используются блоки Three -Phase Series RLC Branch – трехфазная последовательная RLC-цепь.

Three -Phase Series RLC Branch позволяет смоделировать трехфазную цепь, состоящую из трех RLC-цепей. Внешний вид блока представлен на рисунке 2.6, окна задания параметров блока для ЛЭП 110 кВ, ЛЭП 10 кВ и шунта на секции шин на рисунках 2.7, 2.8 и 2.9 соответственно.

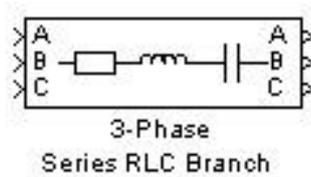


Рисунок 2.6. – Внешний вид блока Three -Phase Series RLC Branch

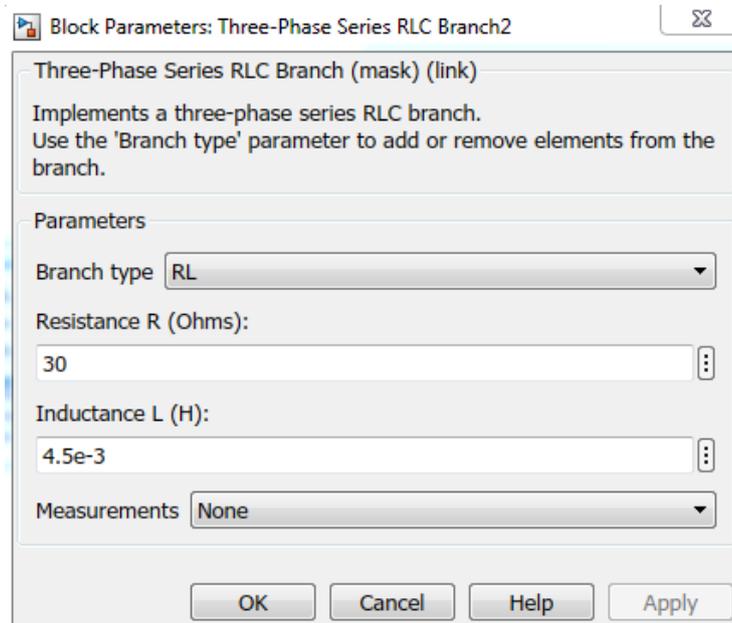


Рисунок 2.7. – Окно задания параметров Three -Phase Series RLC Branch для ЛЭП 110 кВ

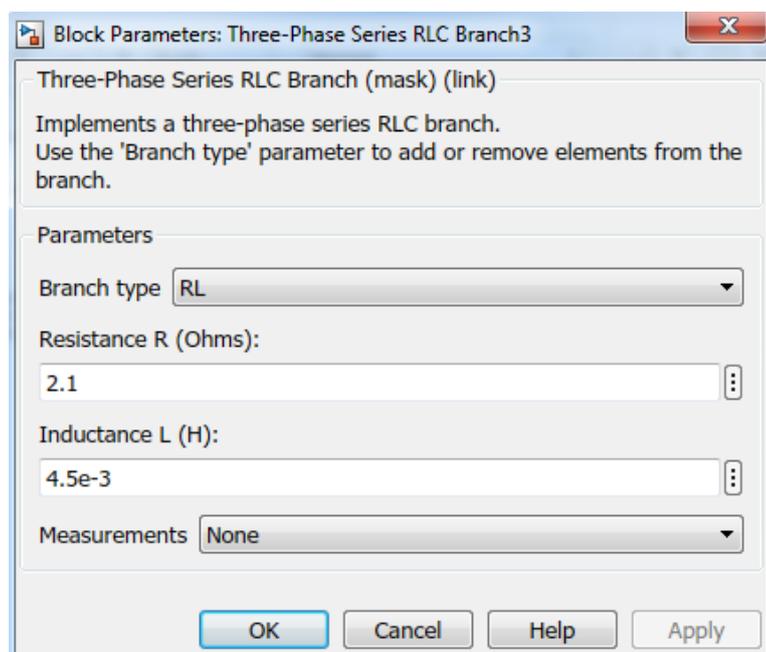


Рисунок 2.8. – Окно задания параметров Three -Phase Series RLC Branch для ЛЭП 10 кВ

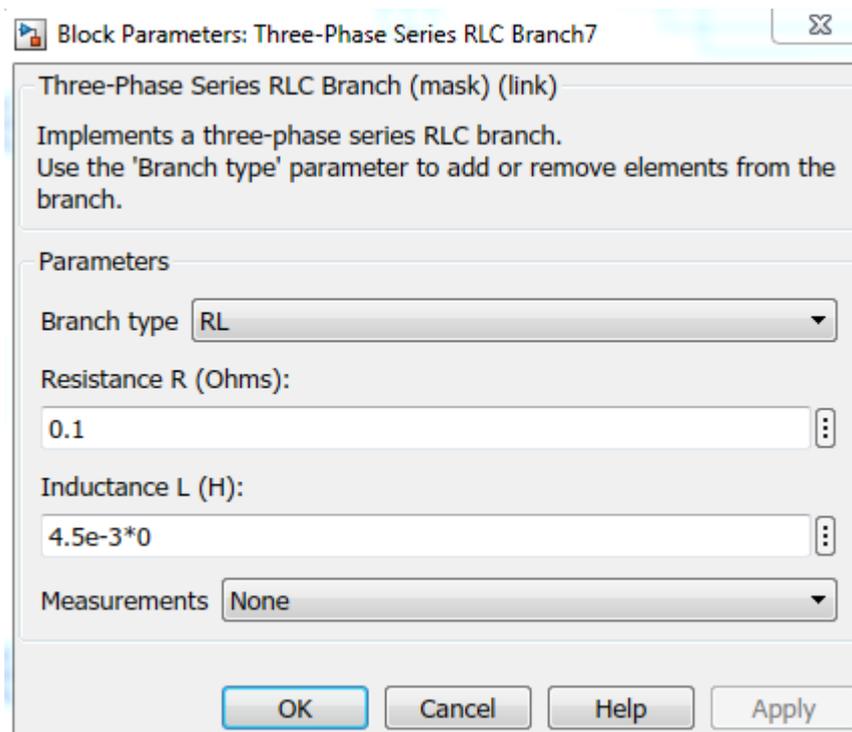


Рисунок 2.9. – Окно задания параметров Three -Phase Series RLC Branch для шунта на секции шин

Параметры блока:

Branch Type – тип нагрузки цепи. Тип ветви выбирается из списка:

- R – активная нагрузка
- L – индуктивная нагрузка
- C – емкостная нагрузка
- RL – активно-индуктивная нагрузка
- RC – активно-емкостная нагрузка
- LC – емкостно-индуктивная нагрузка
- RLC – нагрузка, содержащая активную, индуктивную

и емкостную составляющие

Resistance R (Ohms) – активное сопротивление в одной фазе (Ом).

Inductance L (H) – индуктивность в одной фазе (Гн).

Capacitance C (F) – емкость в одной фазе емкость (Ф).

Для исключения из цепи активного сопротивления/индуктивности нужно задать их значение равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока активное сопротивление/индуктивность отображаться не будет.

Чтобы из цепи исключить конденсатор, нужно задать значение емкости равное бесконечности (inf). В этом случае на пиктограмме блока конденсатор не будет показан.

Трехфазный измеритель Three - Phase V - I Measurement

Для измерения параметров сети используются блоки Three - Phase V - I Measurement – трехфазный измеритель. С помощью данного блока осуществляется измерение напряжений и токов в трехфазных цепях. Настройки для всех блоков трехфазного измерителя приняты одинаковые.

Внешний вид блока представлен на рисунке 2.10, окно задания параметров блока представлено на рисунке 2.11.

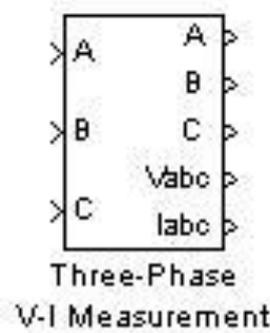


Рисунок 2.10. – Внешний вид блока Three - Phase V - I Measurement

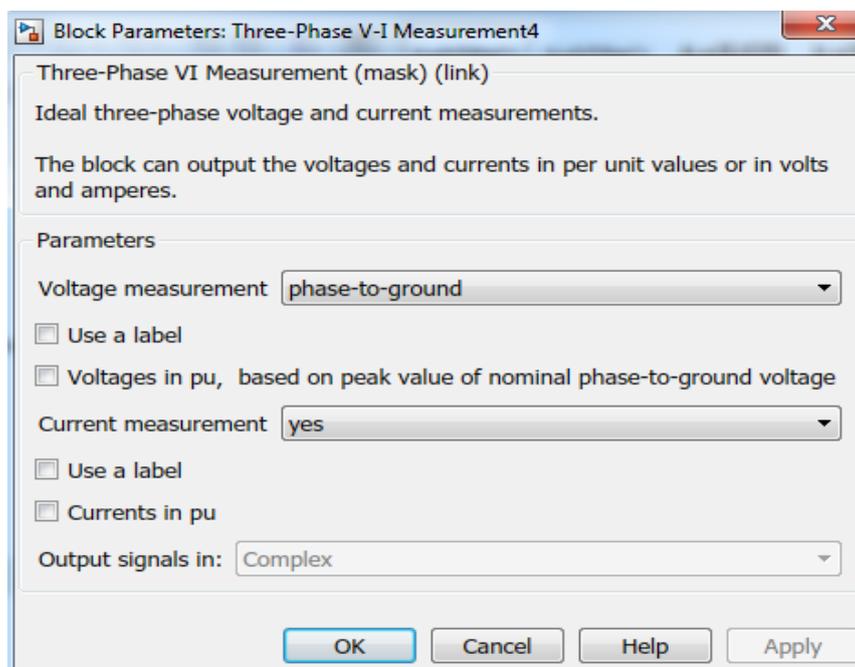


Рисунок 2.11. – Окно задания параметров Three - Phase V - I Measurement

Параметры блока Three - Phase V - I Measurement:

Voltage Measurement – измерение напряжений. В данной графе производится выбор измеряемого напряжения из следующего списка:

- no - напряжения не измеряются;
- phase-to-ground - измерение фазного напряжения;
- phase-to-phase - измерение линейного напряжения.

В данной модели происходит измерение фазных напряжений.

Use a label – использовать метку. При установке флажка сигнал будет передаваться к блоку From. Параметр Goto tag блока From должен соответствовать имени метки, заданной в графе Signal label. В данной модели не используется.

Voltages in p.u. – измерение напряжений в относительных единицах. измеренные напряжения, при установке флажка будут преобразованы в соответствии со следующим выражением:

$$U_* = \frac{U}{U_B \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}},$$

Где U_B - базисное напряжение, задаваемое в графе Base voltage.

Base voltage (Vrms phase-phase) – действующее значение линейного напряжения (базисное напряжение).

Current measurement – измерение токов. В данной графе производится выбор измерения токов:

- no -Токи не измеряются.
- yes - Токи измеряются.

Currents in p.u. – измерение токов в относительных единицах. Измеренные токи, при установке флажка будут преобразованы в соответствии со следующим выражением:

$$I_* = \frac{I}{P_B / (U_B \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3})},$$

где P_B - базисная мощность, задаваемая в графе Base power.

Base power (VA 3 phase) – базисная мощность.

Трехфазный короткозамыкатель 3-Phase Fault

Короткие замыкания моделируются с помощью блока 3-Phase Fault. Моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю. Внешний вид блока изображён на рисунке 2.12. Схема устройства показана на рисунке 2.13. Величина сопротивления заземления R_g устанавливается равной 10^6 Ом, если замыкание на землю не задано в окне параметров блока.

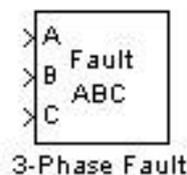


Рисунок 2.12. – Внешний вид блока 3-Phase Fault

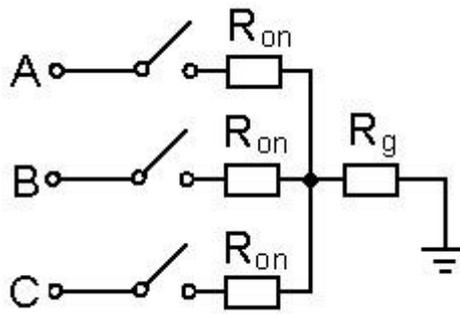


Рисунок 2.13 – Схема устройства блока 3-Phase Fault

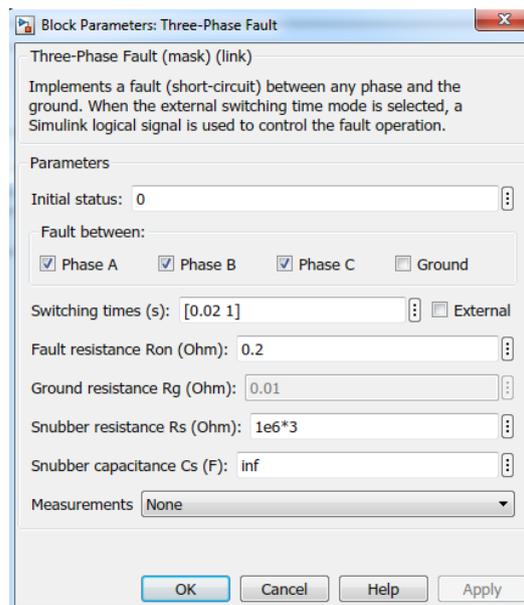


Рисунок 2.14. – Окно задания параметров Three - Phase Fault

Параметры блока Three - Phase Fault:

Initial status – состояние ключей. Состояние ключей, которое соответствует моменту времени, заданному вектором (0 - разомкнутый ключ, 1 - замкнутый ключ). Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера.

Switching times (s) – время замыкания/ размыкания ключей (в зависимости от начального состояния ключей согласно параметру **Initial status**). Параметр задается в секундах в виде вектора значений времени, определяющих моменты срабатывания ключей. Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера.

Fault between:Phase A/ Phase B/ Phase C/ Ground – Управление ключом фазы A/ B/ C/ земля. При снятом флажке управление ключом не производится.

Fault resistance $R_{on}(\text{Ohm})$ – сопротивление выключателей в замкнутом состоянии (Ом)].

Ground resistance $R_g(\text{Ohm})$ – сопротивление заземления (Ом)]. Величина сопротивления заземления не может задаваться равной нулю.

External control of switching times – внешнее управление временем срабатывания. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей. В данной модели не используется

Sample time of the internal timer T_s (s): – Шаг дискретизации встроенного таймера.

Snubbers resistance $R_s(\text{Ohm})$ – сопротивление искрогасящей цепи (Ом).

Snubbers capacitance $C_s(\text{F})$ – емкость искрогасящей цепи (Ф).

Measurements – измеряемые переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- None - нет переменных для отображения,
- Fault voltages - напряжения на входных зажимах короткозамыкателя,
- Fault currents - токи короткозамыкателя,
- Fault voltages and currents - напряжения и токи короткозамыкателя.

Phase Breaker – Трехфазный выключатель переменного тока

Моделирует трехфазное устройство включения и выключения переменного тока. Состоит из трех блоков Breaker, управляемых одним сигналом.

Изображение блока Breaker представлено на рисунке 2.15, окно задания параметров блока на рисунке 2.16

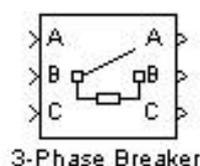


Рисунок 2.15 – Изображение блока Three Phase Breaker

Block Parameters: 3-Phase Breaker

Three-Phase Breaker (mask) (link)

Connect this block in series with the three-phase element you want to switch. You can define the breaker timing directly from the dialog box or apply an external logical signal. If you check the 'External control' box, the external control input will appear.

Parameters

Initial status of breakers: open

Switching of phase A

Switching of Phase B

Switching of phase C

Transition times (s): [4/60 10/60]

Sample time of the internal timer Ts(s): 0

External control of switching times

Breakers resistance Ron (ohms): 0.001

Snubbers resistance Rp (Ohms): 1e6

Snubbers capacitance Cp (Farad): inf

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Рисунок 2.16 – Окно задания параметров блока Three Phase Breaker

Параметры блока:

Initial status of breakers: начальное состояние ключей. Значение параметра выбирается из списка:

- open - все ключи открыты,
- closed - все ключи закрыты.

Switching of phase A/B/C: управление ключом фазы A/B/C. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Initial status of breakers.

Transition times (s): время срабатывания выключателя. Параметр задается в виде вектора, определяющего моменты времени срабатывания выключателя.

Sample time of the internal timer T_s (s): шаг дискретизации встроенного таймера.

External control of switching times: внешнее управление временем срабатывания. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей, при этом разрыв цепи в каждой фазе выполняется при достижении током этой фазы нулевого уровня.

Breaker resistance R_{on} (Ohm): сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом).

Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed'): начальное состояние выключателя (0 - разомкнут, 1 - замкнут).

Snubber resistance R_s (Ohm): сопротивление искрогасящей цепи (Ом).

Snubber capacitance C_s (F): емкость искрогасящей цепи (Ф).

Measurements: измеряемые переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- None - нет переменных для отображения,
- Branch voltage Voltage- напряжение на зажимах элемента,
- Branch current - ток элемента,
- Branch voltage and current - напряжение и ток элемента.

Осциллограф Scope

Строит графики исследуемых сигналов в функции времени. Позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

Изображение блока и окно для просмотра графиков показаны на рисунке 2.17.

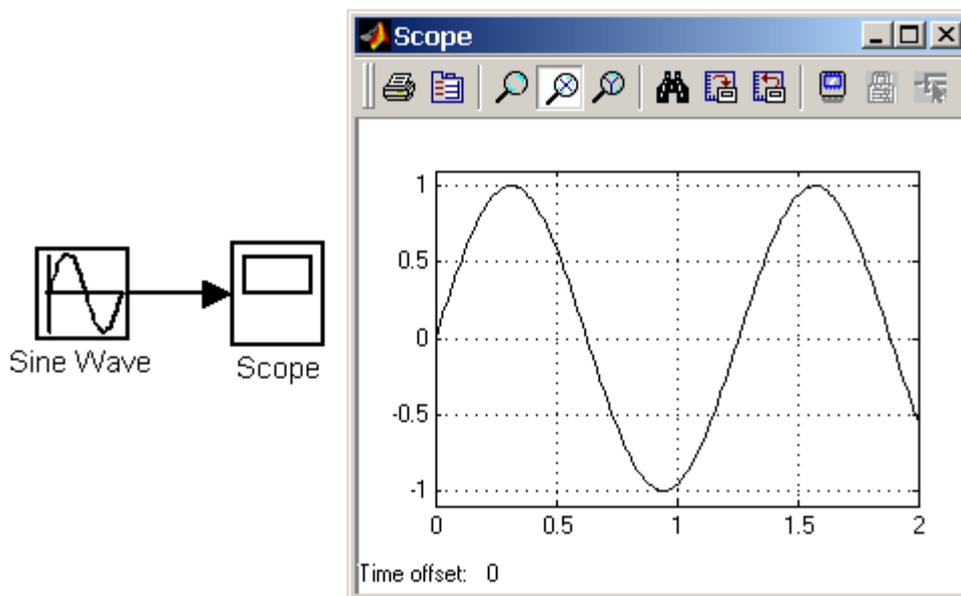


Рисунок 2.17 – Изображение блока Scope и окно для просмотра графиков

Параметры блока устанавливаются в окне 'Scope' parameters, которое открывается с помощью инструмента (Parameters) панели инструментов. Окно параметров имеет две вкладки:

General – общие параметры.

Data history – параметры сохранения сигналов в рабочей области MATLAB.

Вкладка общих параметров показана на рисунке 2.18.

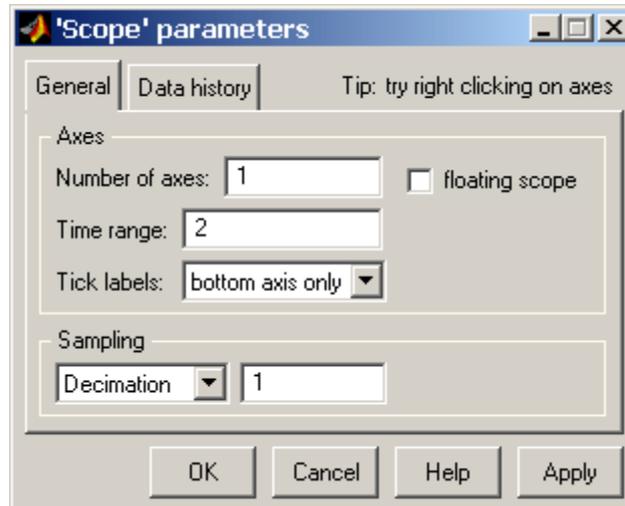


Рисунок 2.18 – Вкладка общих параметров General.

На вкладке General задаются следующие параметры:

Number of axes — число входов (систем координат) осциллографа. При изменении этого параметра на изображении блока появляются дополнительные входные порты.

Time range — величина временного интервала для которого отображаются графики. Если время расчета модели превышает заданное параметром Time range, то вывод графика производится порциями, при этом интервал отображения каждой порции графика равен заданному значению Time range.

Tick labels — вывод/скрытие осей и меток осей. Может принимать три значения (выбираются из списка):

- all – подписи для всех осей,
- none – отсутствие всех осей и подписей к ним,

- `bottom axis only` – подписи горизонтальной оси только для нижнего графика.

`Sampling` — установка параметров вывода графиков в окне. Задаёт режим вывода расчетных точек на экран.

`Floating scope` – перевод осциллографа в “свободный” режим (при установленном флажке).

На вкладке `Data history` задаются следующие параметры:

`Limit data points to last` – максимальное количество отображаемых расчетных точек графика. При превышении этого числа начальная часть графика обрезается. В том случае, если флажок параметра `Limit data points to last` не установлен, то Simulink автоматически увеличит значение этого параметра для отображения всех расчетных точек.

`Save data to workspace` – сохранение значений сигналов в рабочей области MATLAB.

`Variable name` – имя переменной для сохранения сигналов в рабочей области MATLAB.

`Format` – формат данных при сохранении в рабочей области MATLAB. Может принимать значения:

`Array` – массив,

`Structure` – структура,

`Structure with time` – структура с дополнительным полем “время”.

2.3 Программа исследований ограничения токов короткого замыкания и апробация модели

Моделирование необходимо выполнять по следующему алгоритму: в определённый момент времени происходит короткое замыкание, далее включается шунтирующий выключатель, после чего происходит отключение

линейного выключателя отходящего присоединения, далее размыкается шунтирующий выключатель. Осуществляется контроль параметров сети на отходящем повреждённом присоединении, на шунтирующем ТООУ, а также на шинах ПС. Полученные осциллограммы тока и напряжений необходимо проанализировать и сделать вывод о применимости вакуумных ТООУ шунтирующего типа.

Выполним апробацию модели на примере трёхфазного КЗ в начале КЛ:

Сперва проведем испытание без шунтирования (рисунок 2.19). после с шунтирование (рисунок 2.20)

В данном опыте блок трёхфазного короткозамыкателя (3-Phase Fault) расположен в начале линии и настроен на замыкание всех трёх фаз. Шунтирование с помощью выключателя происходит так же по трем фазам.

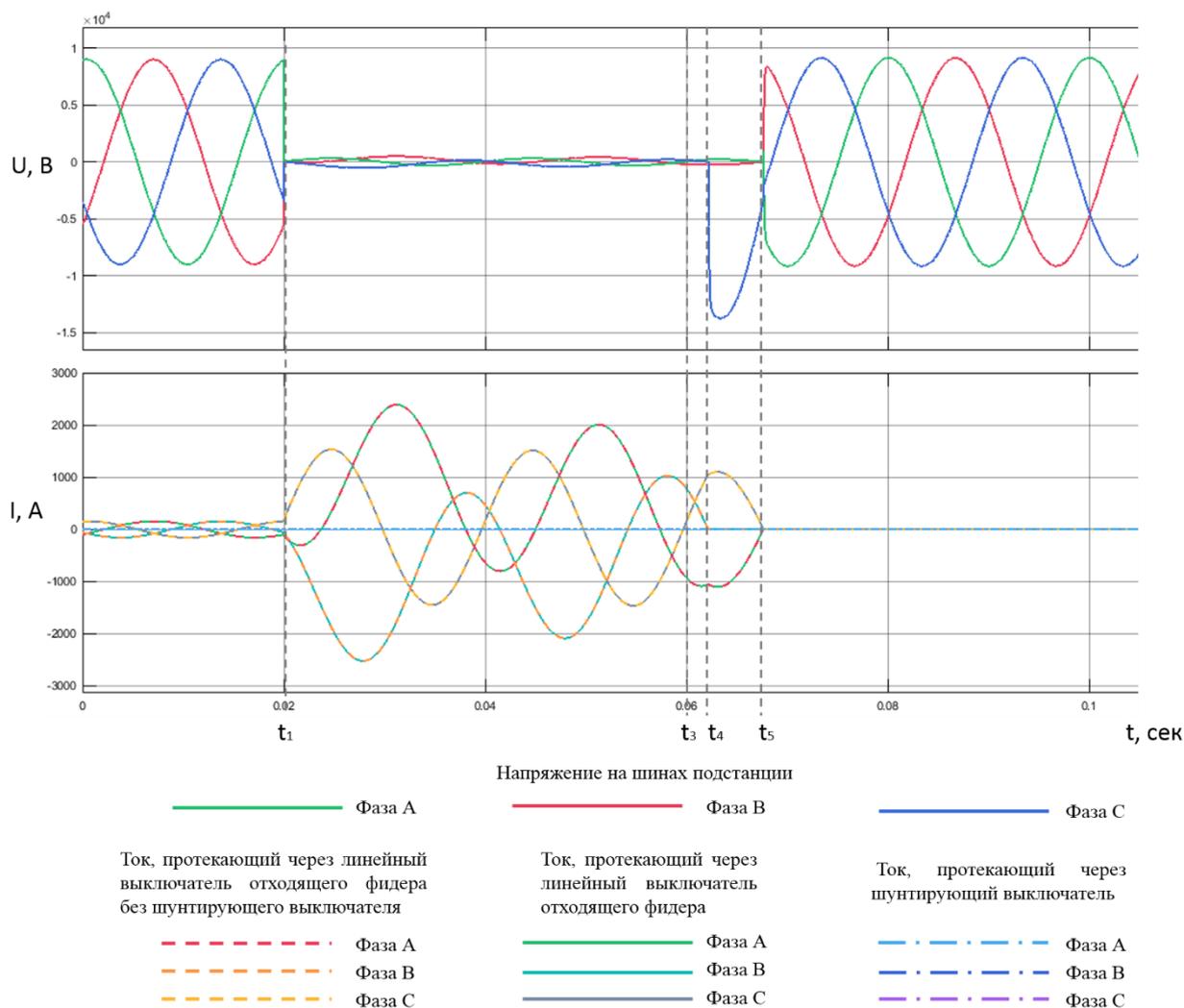


Рисунок 2.19 – Трёхфазное КЗ в начале КЛ без шунтирования

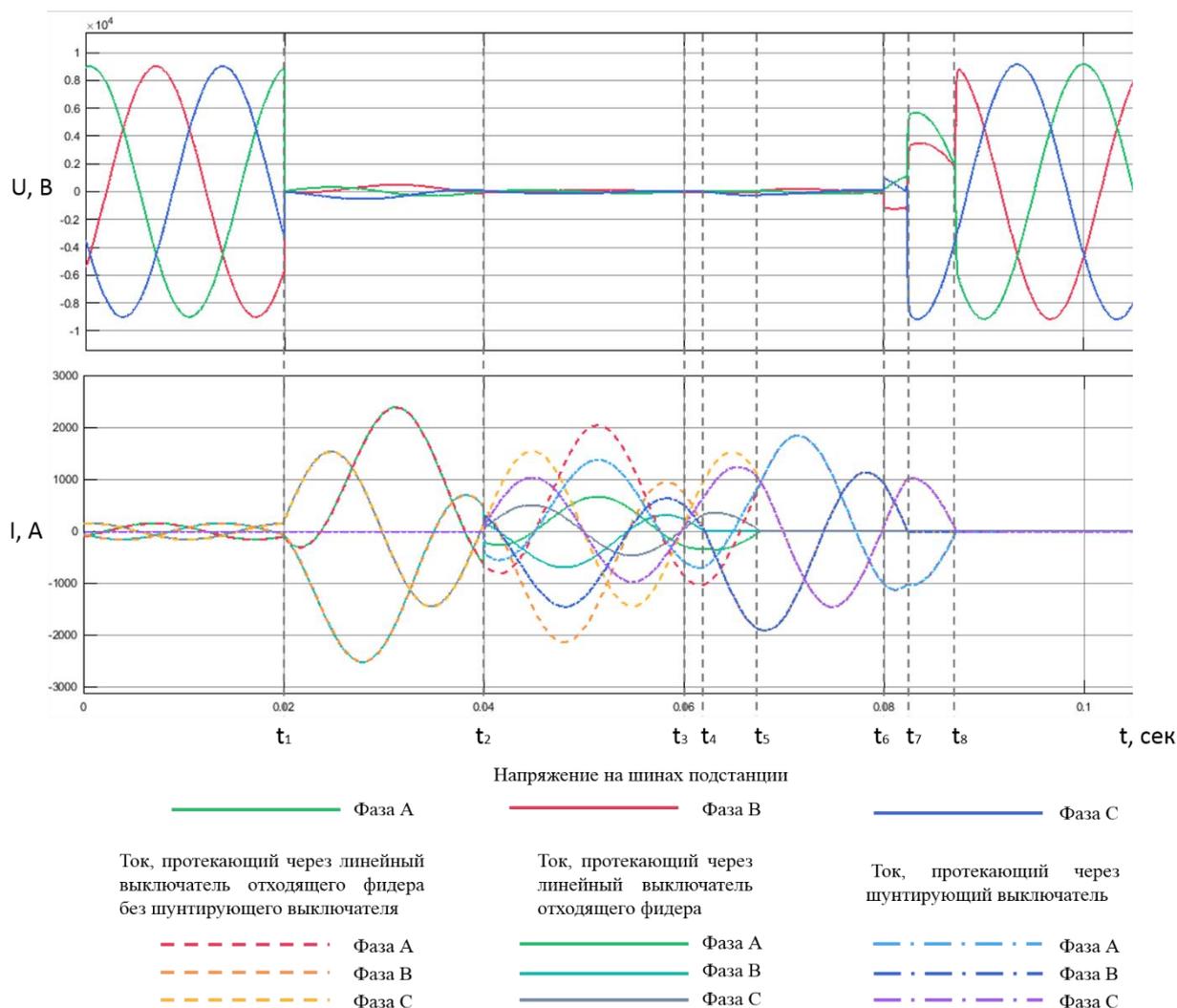


Рисунок 2.20 – Трёхфазное КЗ в начале КЛ с шунтированием

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы В линейного выключателя

t_5 – время отключения фаз А и С линейного выключателя

t_6 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_7 – время отключения фазы В шунтирующего выключателя

t_8 – время отключения фазы А и С шунтирующего выключателя

2.4 Выводы по главе

В данной главе:

1. Выбрана модель фрагмента электрической сети для численного моделирования ограничения тока при коротком замыкании;
2. Выбран программный комплекс для моделирования;
3. В программном комплексе MATLAB Simulink составлена модель фрагмента электрической сети для численного моделирования ограничения тока при коротком замыкании
4. Составлена программа исследований ограничения токов короткого замыкания;
5. Выполнена апробация модели. Модель работает исправно

Глава 3 Анализ исследований и перспективы применения вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа в электрических сетях

3.1 Процессы аварийного отключения элементов электрической сети

В данном разделе представлены результаты численного моделирования. Были рассмотрены следующие аварийные режимы:

- трехфазное КЗ в начале ЛЭП
- трехфазное КЗ в конце ЛЭП
- двухфазное КЗ в начале ЛЭП
- двухфазное КЗ в конце ЛЭП

Для наглядности сравнительного анализа, было проведено моделирование отключения тока КЗ без шунтирующего выключателя и с шунтированием.

Трехфазное КЗ в начале КЛ

В данном опыте блок трехфазного короткозамыкателя (3-Phase Fault) расположен в начале линии и настроен на замыкание всех трёх фаз. Шунтирование с помощью выключателя происходит так же по трем фазам.

На рисунке 3.1 представлена осциллограмма токов проведенного моделирования трехфазного КЗ в начале КЛ.

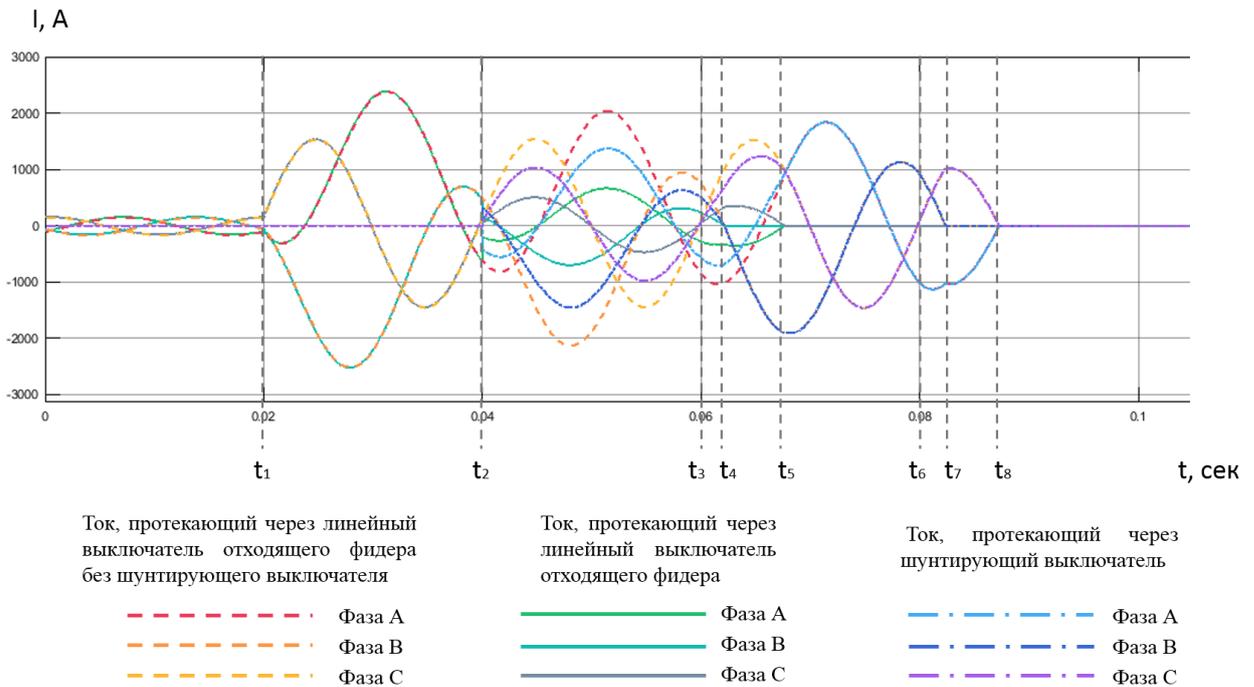


Рисунок 3.1 – осциллограмма токов трехфазного КЗ в начале кабельной линии.

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы В линейного выключателя

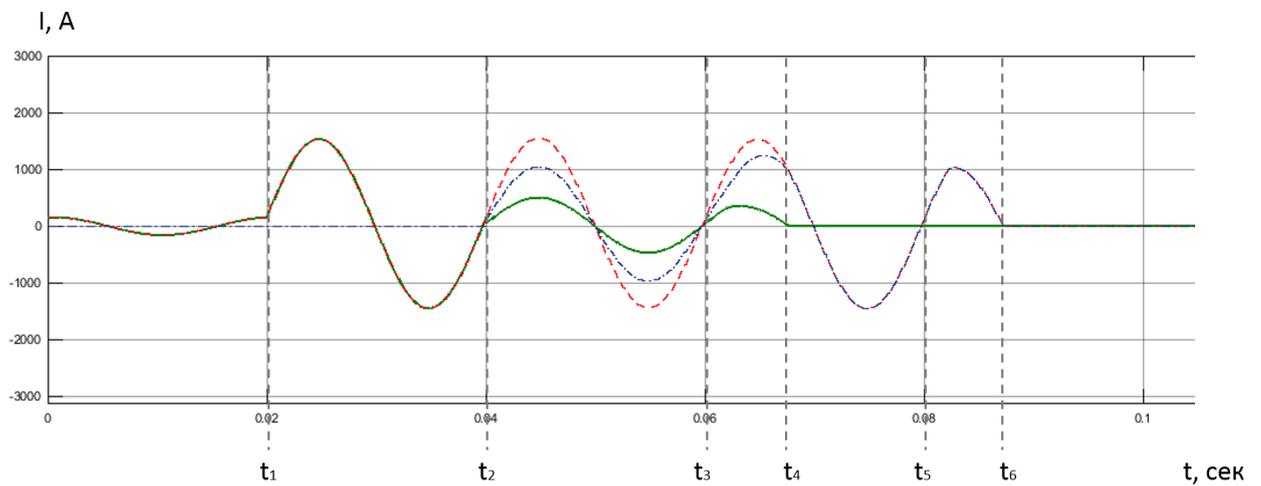
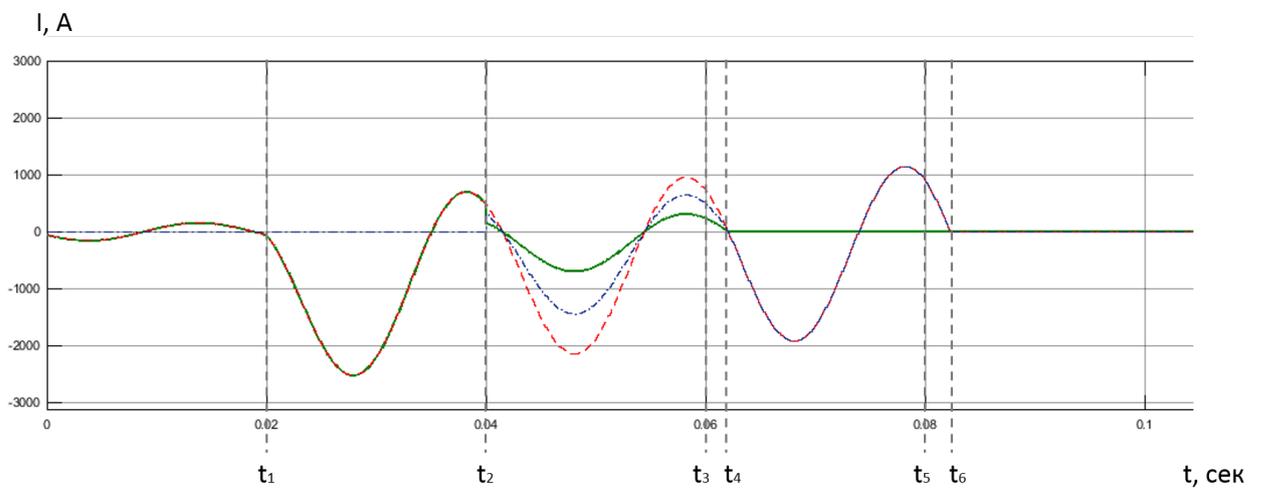
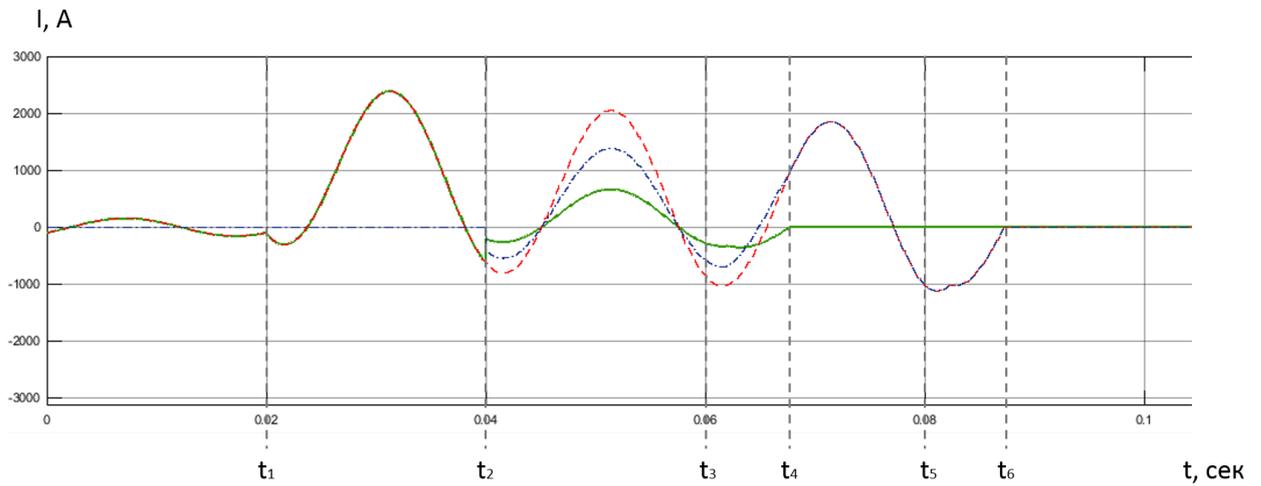
t_5 – время отключения фаз А и С линейного выключателя

t_6 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_7 – время отключения фазы В шунтирующего выключателя

t_8 – время отключения фазы А и С шунтирующего выключателя

Далее на рисунке 3.2 для большей наглядности приведены осциллограммы токов проведенного моделирования трехфазного КЗ в начале ЛЭП отдельно по каждой фазе:



Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера без шунтирующего выключателя

Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера

- - - - -
Ток, протекающий через шунтирующий выключатель

Рисунок 3.2 – осциллограмма токов трехфазного КЗ в начале кабельной линии, сверху вниз поочередно фаза А/ фаза В/ фаза С

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы А/В/С линейного выключателя

соответственно

t_5 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_6 – время отключения фазы А/В/С шунтирующего выключателя

3.1.2 Трехфазное КЗ в конце КЛ

В данном опыте блок трехфазного короткозамыкателя (3-Phase Fault) расположен в конце линии и настроен на замыкание всех трёх фаз. Шунтирование с помощью выключателя происходит так же по трем фазам.

На рисунке 3.3 представлена осциллограмма токов проведенного моделирования трехфазного КЗ в конце КЛ.

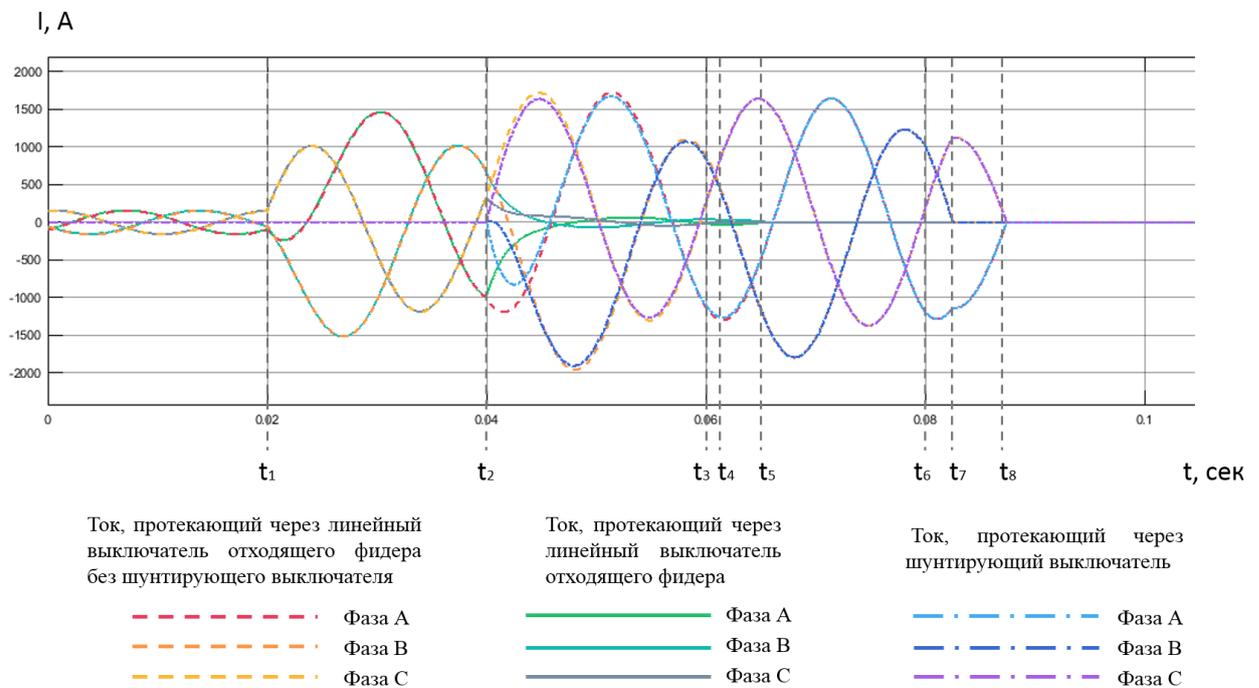


Рисунок 3.3 – осциллограмма токов трехфазного КЗ в конце кабельной линии.

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в конце КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы С линейного выключателя

t_5 – время отключения фаз А и В линейного выключателя

t_6 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_7 – время отключения фазы В шунтирующего выключателя

t_8 – время отключения фазы А и С шунтирующего выключателя

Далее на рисунке 3.4 для большей наглядности приведены осциллограммы токов проведенного моделирования трехфазного КЗ в конце КЛ отдельно по каждой фазе:

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в конце КЛ

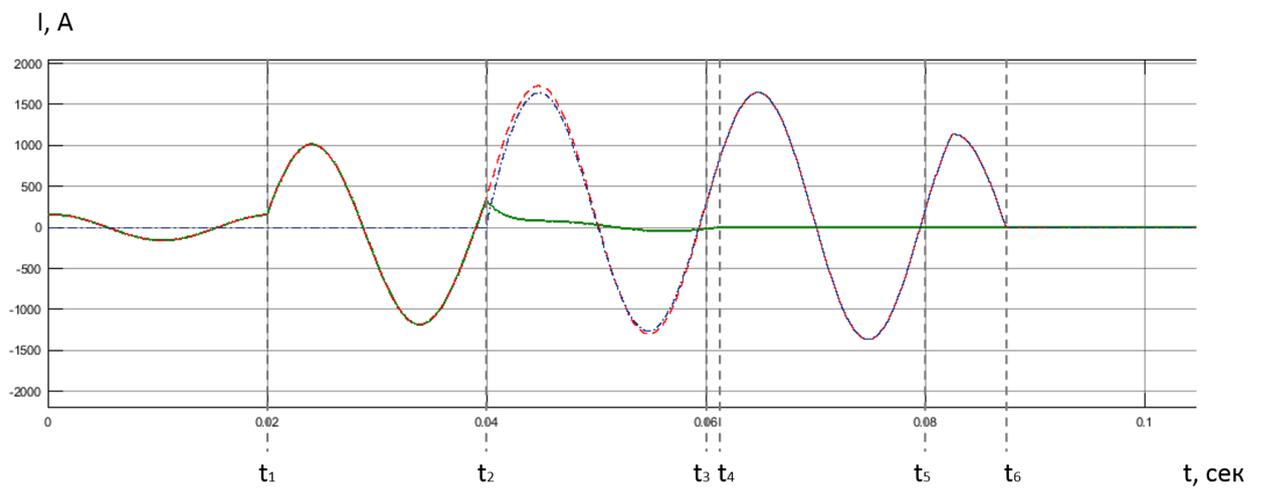
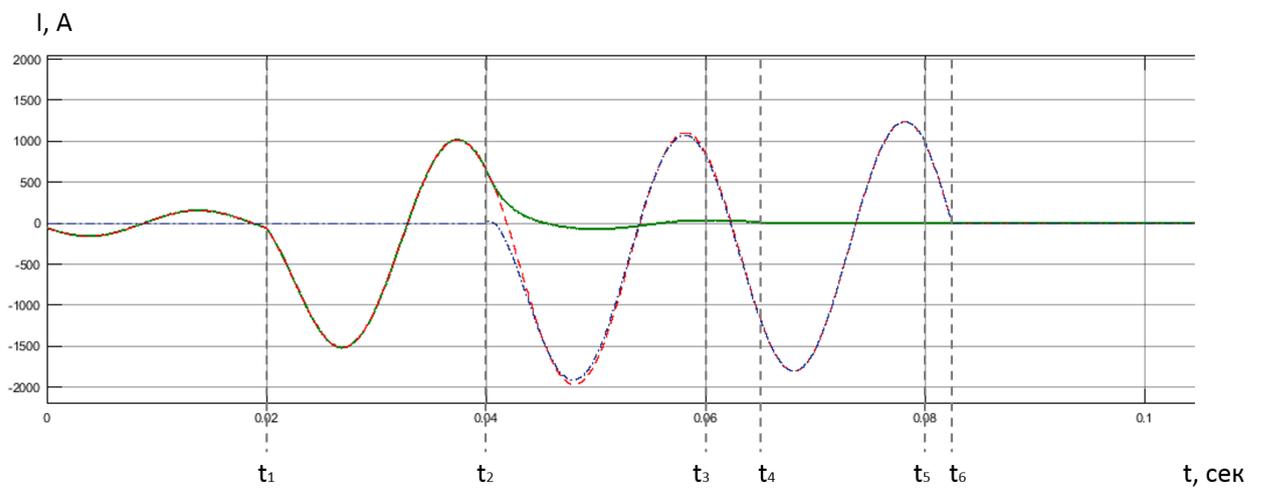
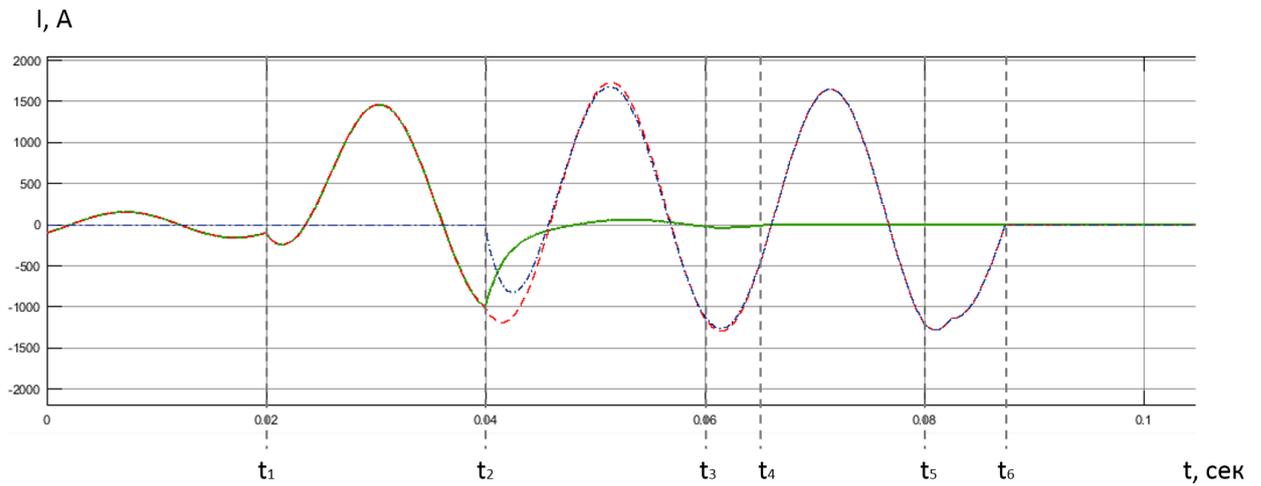
t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы А/В/С линейного выключателя
соответственно

t_5 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_6 – время отключения фазы А/В/С шунтирующего выключателя



Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера без шунтирующего выключателя

—
Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера

- - -
Ток, протекающий через шунтирующий выключатель

Рисунок 3.4 – осциллограмма токов трехфазного КЗ в конце кабельной линии, сверху вниз поочередно фаза А/ фаза В/ фаза С

Двухфазное КЗ в начале КЛ

В данном опыте блок трехфазного короткозамыкателя (3-Phase Fault) расположен в начале линии и настроен на замыкание фаз А и С. Шунтирование с помощью выключателя происходит только по поврежденным фазам.

На рисунке 3.5 представлена осциллограмма токов проведенного моделирования двухфазного КЗ А–С в начале КЛ.

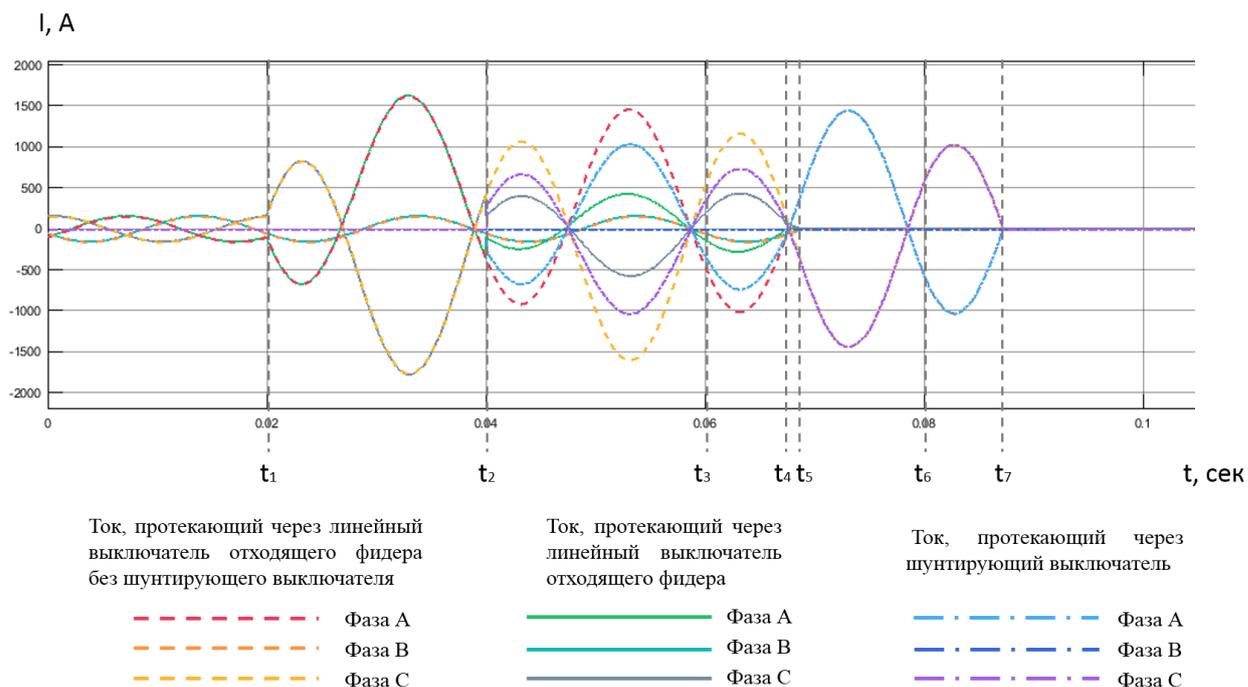


Рисунок 3.5 – осциллограмма токов двухфазного КЗ в начале кабельной линии.

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

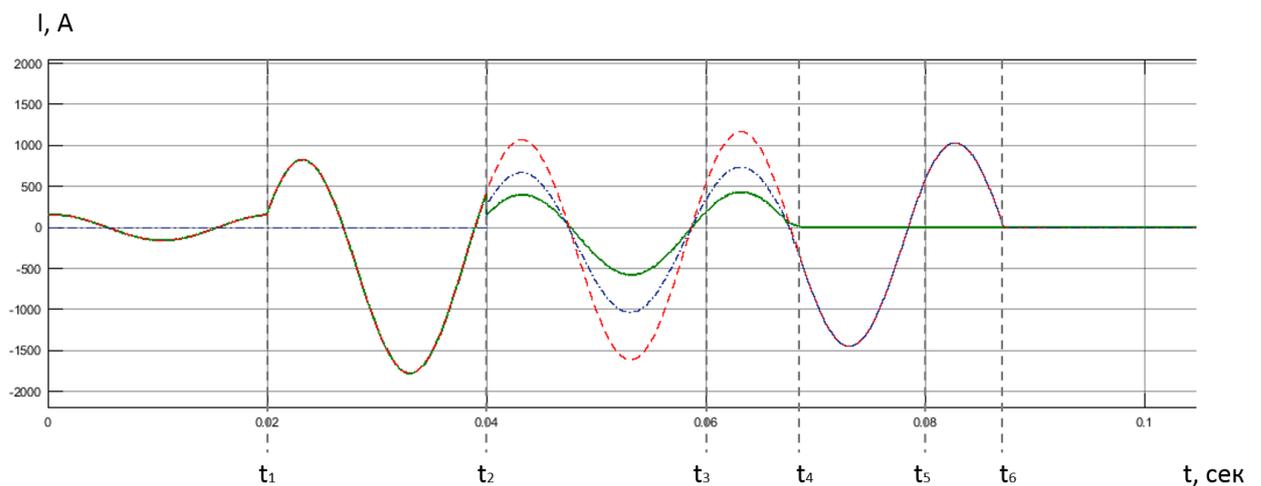
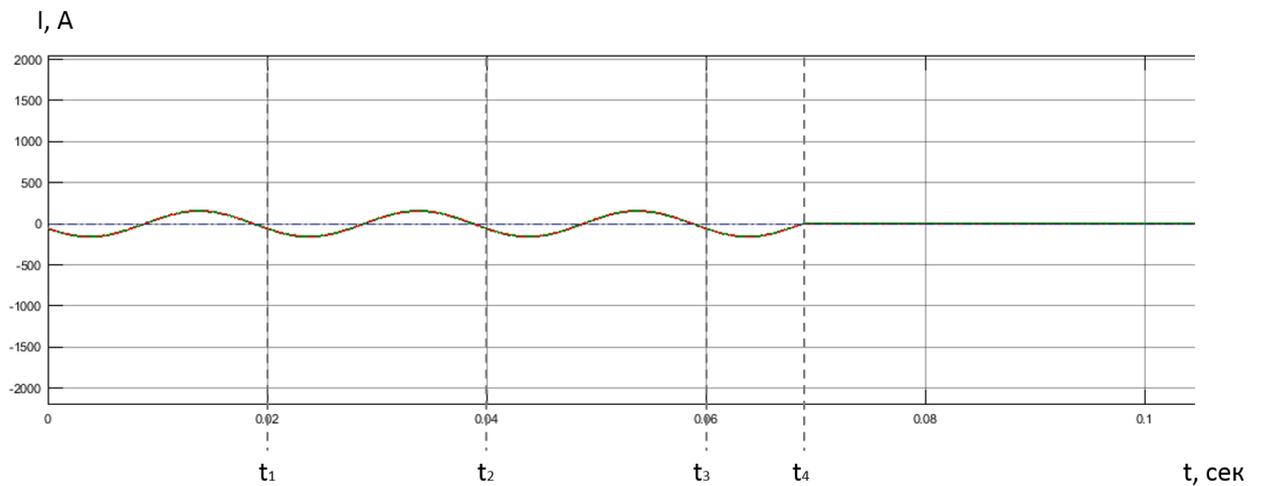
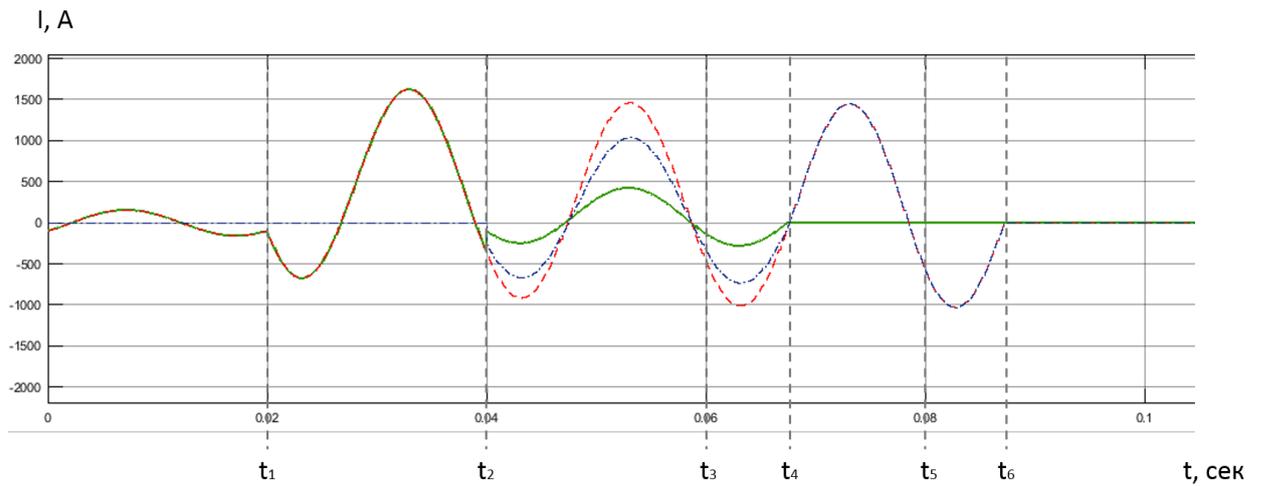
t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы А линейного выключателя

t_5 – время отключения фаз В и С линейного выключателя

t_6 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_7 – время отключения фаз А и С шунтирующего выключателя



Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера без шунтирующего выключателя

Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера

Ток, протекающий через шунтирующий выключатель

Рисунок 3.6 – осциллограмма токов двухфазного КЗ в начале кабельной линии, сверху вниз поочередно фаза А/ фаза В/ фаза С

На рисунке 3.6 для большей наглядности приведены осциллограммы токов проведенного моделирования трехфазного КЗ в конце КЛ отдельно по каждой фазе:

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы А/В/С линейного выключателя
соответственно

t_5 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_6 – время отключения фазы А/С шунтирующего выключателя

Двухфазное КЗ в конце КЛ

В данном опыте блок трехфазного короткозамыкателя (3-Phase Fault) расположен в конце линии и настроен на замыкание фаз А и С. Шунтирование с помощью выключателя происходит только по поврежденным фазам.

На рисунке 3.7 представлена осциллограмма токов проведенного моделирования двухфазного КЗ А–С в конце КЛ.

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы А линейного выключателя

t_5 – время отключения фаз В и С линейного выключателя

t_6 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_7 – время отключения фаз А и С шунтирующего выключателя

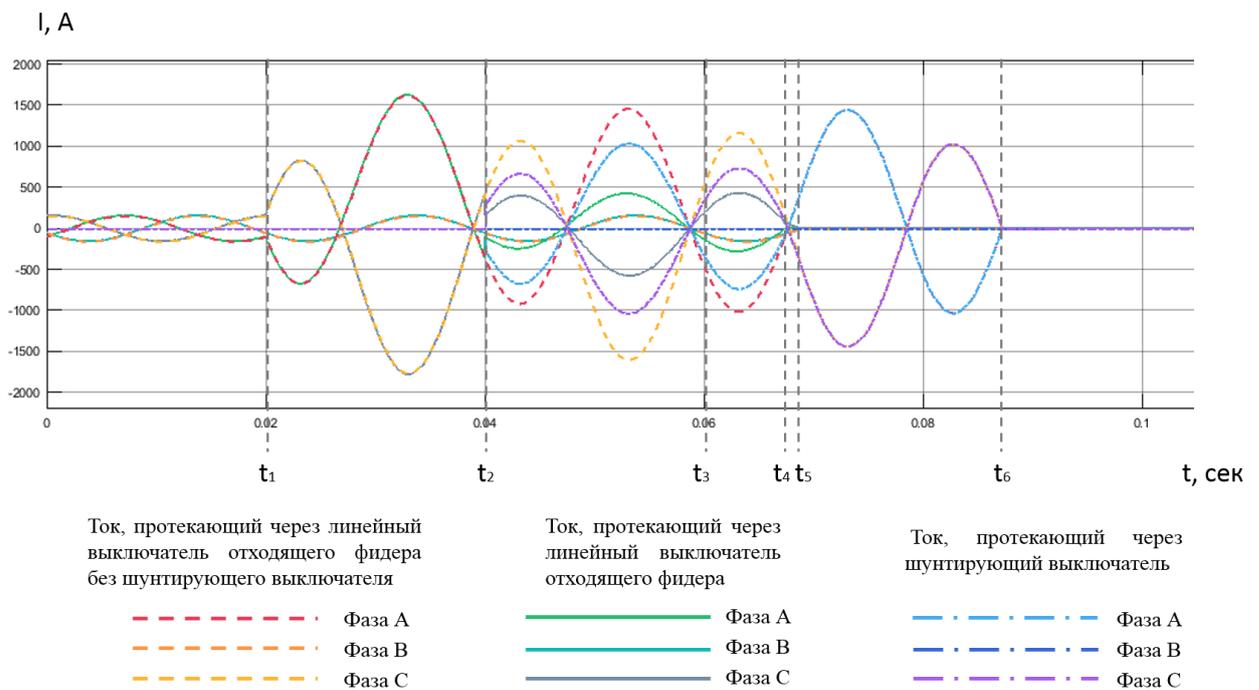


Рисунок 3.7 – Осциллограмма токов двухфазного КЗ в конце кабельной линии.

На рисунке 3.8 для большей наглядности приведены осциллограммы токов проведенного моделирования двухфазного КЗ в конце КЛ отдельно по каждой фазе:

На данном рисунке:

t_1 – время КЗ в начале КЛ

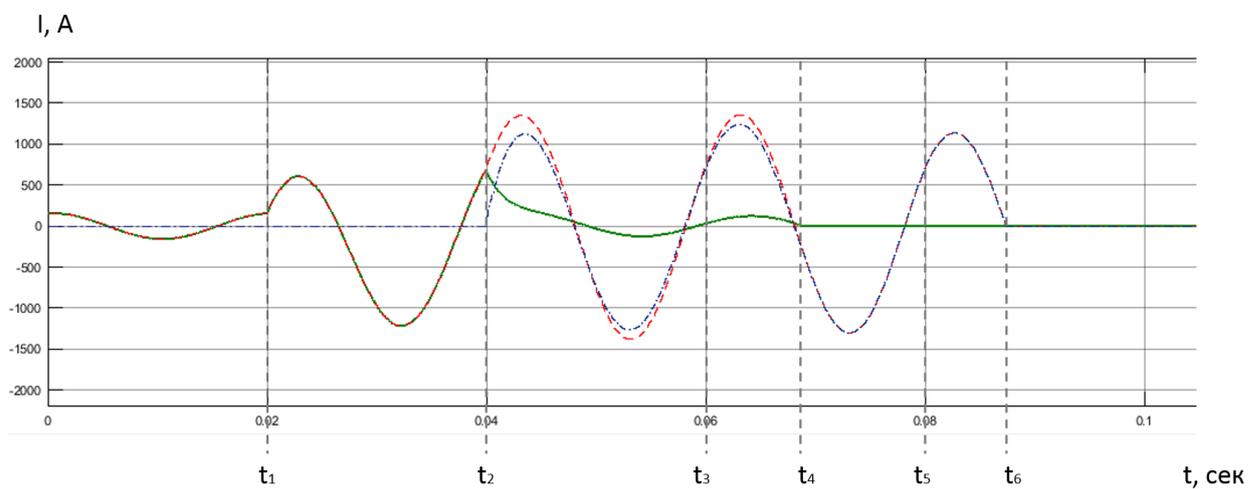
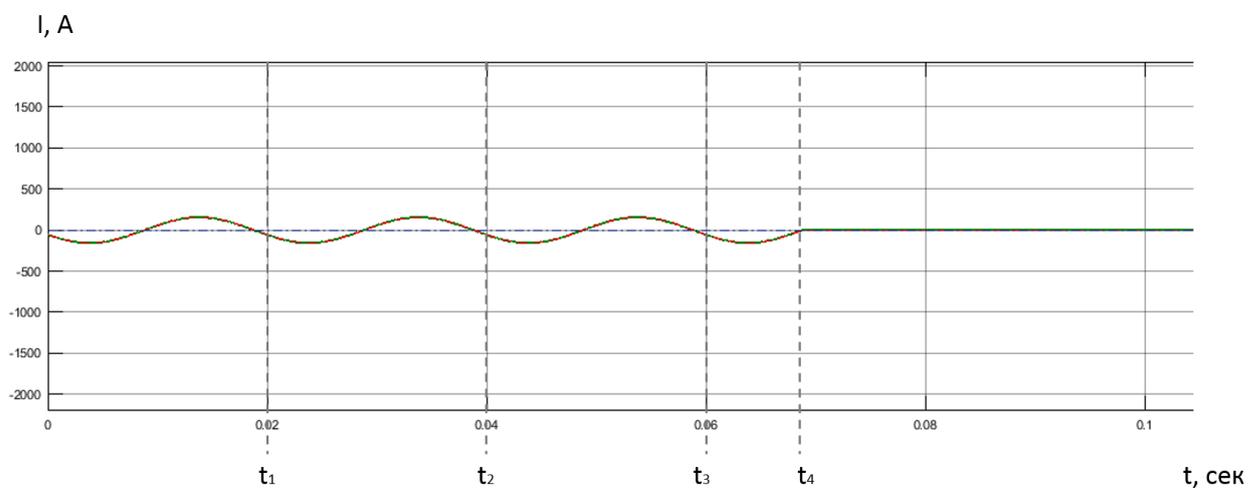
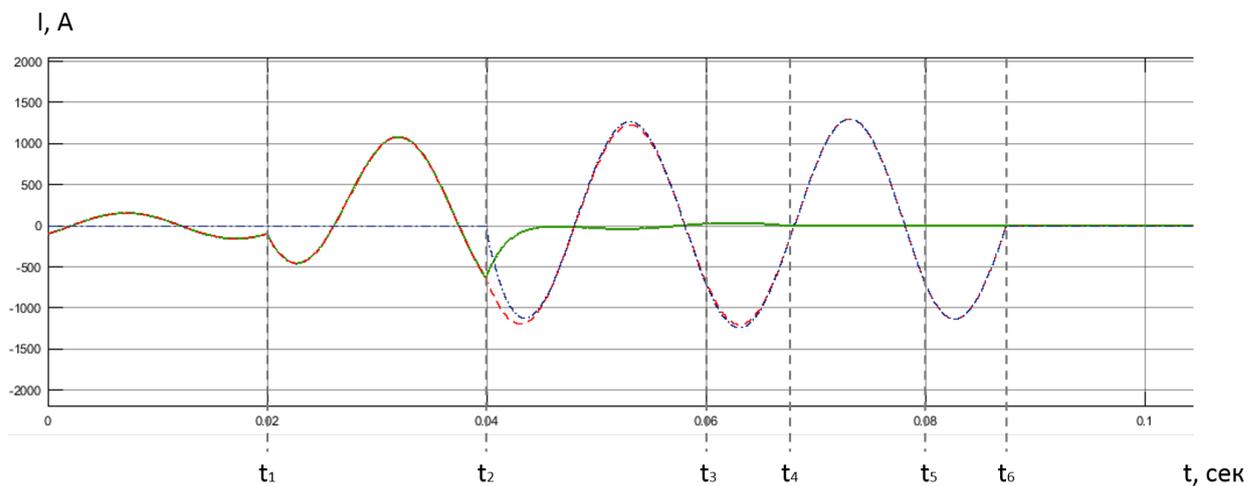
t_2 – время включения шунтирующего выключателя

t_3 – время подачи команды на отключение линейного выключателя

t_4 – время отключения фазы А/В/С линейного выключателя
соответственно

t_5 – время подачи команды на отключение шунтирующего выключателя

t_6 – время отключения фазы А/С шунтирующего выключателя



Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера без шунтирующего выключателя

Ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера

Ток, протекающий через шунтирующий выключатель

Рисунок 3.8 – Осциллограмма токов двухфазного КЗ в конце кабельной линии, сверху вниз поочередно фаза А/ фаза В/ фаза С

3.2 Перспективы применения вакуумных токоограничивающих устройств

При создании КЗ с помощью шунтирующего вакуумного ТОУ напряжение на шинах ПС снижается практически до нуля, таким образом падение напряжения между точкой естественного КЗ и точкой искусственно созданного КЗ равно нулю или стремится к нему, поэтому ток, протекающий через линейный выключатель поврежденного присоединения очень мал по амплитуде. Как видно из представленных выше осциллограмм проведенных испытаний, ток КЗ, протекающий через линейный выключатель отходящего присоединения, в момент включения шунтирующего вакуумного ТОУ практически полностью переходит на шунтирующий выключатель, существенно снижая ток, протекающий через линейный выключатель отходящего фидера. Стоит отметить, что данное наблюдение справедливо для всех возможных коротких замыканий в сети 10 кВ.

Ток, протекающий через линейный выключатель поврежденного присоединения, сопоставим по значению с номинальным током, это позволяет отключить поврежденную линию с меньшими возмущениями. Что уменьшает износ оборудования и повышает коммутационный ресурс выключателя. Так как при наличии вакуумного ТОУ шунтирующего типа линейными выключателями реже производится отключение аварийных токов, следовательно, реже требуется их обслуживание, что приводит к уменьшению времени простоя оборудования и недоотпуска энергии потребителю.

В то же время необходимо обратить внимание, что вакуумные ТОУ шунтирующего типа имеют ряд преимуществ над имеющимися способами ограничения тока короткого замыкания. Так, например, применение предвключаемых резисторов, токоограничивающих реакторов и трансформаторов с расщепленными обмотками снижают надежность электроснабжения потребителей, увеличивают потери в системе, снижают качество напряжения на шинах потребителей, так как ограничение токов КЗ

достигается за счет увеличения суммарного реактивного сопротивления сети, чего не наблюдается при шунтировании. Тиристорные токоограничивающие устройства обладают высокой стоимостью и требуют повышения квалификации персонала за счет малой практики эксплуатации. Преимуществами вакуумных выключателей являются: более широкая номенклатура изделий, серийность производства, пониженные расчётные затраты, большая практика эксплуатации.

Некоторым ограничением использования вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа является ресурс работы выключателей, используемых на электрических подстанциях, где токи КЗ близки к их отключающей способности. Однако и в этих условиях выключатели выдерживают до капитального ремонта 40-50 циклов «отключение-включение», что является приемлемым для многих случаев практического применения этих выключателей в составе ТООУ шунтирующего типа. При этом следует учитывать, что при организации синхронных циклов «отключение-включение» ресурс выключателей в составе ТООУ шунтирующего типа, может быть кратно увеличен. Относительно линейных выключателей ожидается, что их ресурс возрастет за счёт значительного ограничения отключаемых токов КЗ. Это позволяет продлить срок службы имеющихся линейных выключателей.

Как правило, на подстанциях с РУ 10 кВ довольно много отходящих присоединений. В то же время, так как снижается ток, протекающий через линейный выключатель поврежденного фидера, снижаются требования к отключающей способности линейных выключателей. Таким образом возможен принципиально новый подход к строительству новых ПС. Так, при использовании вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа, на фидерах можно использовать выключатели с меньшей отключающей способностью. Следовательно, возможна значительная экономическая выгода за счёт снижения общей стоимости линейных выключателей на фидерах ПС

3.3 Выводы по главе

1. Проведены экспериментальные исследования ограничения токов КЗ вакуумными ТОУ шунтирующего типа
2. Выполнен анализ исследований: применение вакуумными ТОУ шунтирующего типа позволяет существенно снизить ток, протекающий через повреждённое присоединение при всех видах КЗ;
3. Вакуумные ТОУ шунтирующего типа имеют ряд преимуществ по сравнению с имеющимися методами ограничения токов КЗ
4. Вакуумные ТОУ шунтирующего типа имеют высокую экономическую эффективность
5. Предложены перспективы применения в ЭС

Заключение

1. Проведено исследование ограничения токов КЗ в ЭС с использованием вакуумных ТОУ шунтирующего типа при трехфазных и двухфазных КЗ, возникающих как в начале, так и в конце КЛ. Выявлено, что использование вакуумных ТОУ шунтирующего типа позволяет существенно снизить ток КЗ, протекающий через повреждённое присоединение. Следовательно, вакуумные токоограничивающие устройства шунтирующего типа перспективны для защиты электроэнергетических сетей от короткого замыкания.

2. Ток, протекающий через линейный выключатель поврежденного присоединения, сопоставим по значению с номинальным током, это позволяет отключить поврежденную линию с меньшими возмущениями. Что уменьшает износ оборудования и повышает коммутационный ресурс выключателя. Так как при наличии вакуумного ТОУ шунтирующего типа линейными выключателями реже производится отключение аварийных токов, следовательно, реже требуется их обслуживание, что приводит к уменьшению времени простоя оборудования и недоотпуска энергии потребителю.

3. Вакуумные ТОУ шунтирующего типа имеют ряд преимуществ над имеющимися способами ограничения тока короткого замыкания. Их применение не приводит к увеличению потерь в системе, снижению качества напряжения на его шинах, снижению надежности электроснабжения потребителей, по сравнению с применением предвключаемых резисторов, токоограничивающих реакторов и трансформаторов с расщепленными обмотками. Вакуумные выключатели обладают рядом преимуществ по сравнению с тиристорными ТОУ: более широкая номенклатура изделий, серийность производства, пониженные расчётные затраты, большая практика эксплуатации

4. При внедрении в ЭС вакуумных ТОУ шунтирующего типа возможен принципиально новый подход к строительству новых ПС. В связи

со снижением требования по отключающей способности линейных выключателей, можно существенно снизить затраты на строительство новых ПС. Так на фидерах можно использовать выключатели с меньшей отключающей способностью.

Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной задачей технико-экономического расчёта является определение величины экономического эффекта от использования в общественном производстве основных и сопутствующих результатов, получаемых при решении поставленной задачи в магистерской диссертации.

Целью исследовательской работы является минимизация хозяйственно-экономических затрат при одинаковой технической значимости решения

исследование перспектив применения вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа.

Задачи: увеличение надёжности энергосистемы и уменьшение затрат при ограничении токов короткого замыкания, а также при строительстве новых подстанций.

4.1 Экономическая модель проекта

В связи с увеличением генерируемые мощности, происходит усиление связей с соседними энергосистемами, создаются крупные объединенные системы, охватывающие не только территории отдельных стран, но и целые континенты. Что в свою очередь приводит к росту токов КЗ.

Максимальный уровень токов короткого замыкания, определяющий требования к электрическим аппаратам и оборудованию, становится критическим параметром, затрудняющим развитие электрических систем.

По данным специалистов ОАО «ФСК ЕЭС» и Межрегиональных распределительных сетевых компаний, уже в настоящее время на целом ряде подстанций энергосистем токи КЗ приближены к предельным значениям, не позволяющим увеличивать нагрузку данных подстанций при реконструкции и сооружении новых линий связи с вводимыми генерирующими источниками.

Есть несколько путей решения проблемы:

1. применение специальных токоограничивающих устройств. Таких как: предвключаемые резисторы, демпфирующие реакторы, тиристорные токоограничивающих устройств шунтирующего типа.
2. Модернизация оборудования: усовершенствование изоляции трансформаторов, замена установленных выключателей на выключатели с более высокой отключающей способностью, которые обладают большими весогабаритными показателями
3. изменение конфигурации сети, схемы подстанции, ввод новой линии
4. применение вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа

4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Экономически выгодно применять меры по ограничению токов КЗ, если дополнительные затраты на это окупаются благодаря применению более легкой аппаратуры и токоведущих частей и повышается надежность электроснабжения потребителей

рассмотрим все варианты вышеперечисленные варианты в технико-экономическом аспекте:

Изменение конфигурации сети:

Секционирование электрической сети обычно влечет за собой увеличение потерь электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах в нормальном режиме работы, так как распределение потоков мощности при этом может быть неоптимальным. По этой причине решение о секционировании должно приниматься после специального технико-экономического обоснования.

Для изменения конфигурации сети требуются:

1. отвод земель;
2. строительство воздушных или кабельных линий, шин;
3. установка опор;
4. возведение фундамента.

Изменение конфигурации сети включает в себя изменение РУ не только низшего, но и высшего напряжения – процесс слишком ресурсозатратный. Может повлечь за собой длительный простой оборудования и, как следствие, недоотпуск электроэнергии. Что имеет непосредственное влияние на прибыль энергетических распределительных компаний.

Применение специальных токоограничивающих устройств

Применение специальных токоограничивающих устройств, таких как: предвключаемые резисторы, демпфирующие реакторы, трансформаторы с расщепленной обмоткой приводят к снижению надежности электроснабжения потребителей, увеличению потерь в системе, снижению качества напряжения на его шинах, так как ограничение токов КЗ достигается за счет увеличения суммарного реактанса сети.

Тиристорные токоограничивающие устройства обладают высокой стоимостью и малой практикой эксплуатации в электрических сетях, что повлечет за собой необходимость повышения квалификации персонала.

Модернизация оборудования:

Усовершенствование изоляции – процесс очень трудоёмкий, влечет за собой замену токопроводов и силового оборудования. Замена установленных выключателей на выключатели с более высокой отключающей способностью, которые обладают большими весогабаритными показателями. Выходит, что на каждом присоединении потребуется замена выключателя, что повлечет за собой длительный недоотпуск электроэнергии потребителю. В то же время необходимо учесть, что выключатели с более высокой отключающей способностью обладают большей стоимостью. Отметим также, что отходящих присоединений по стороне 10 кВ, как правило не менее пяти, что увеличивает затраты, как минимум в 5 раз.

Применение вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа

Применение ТОУ нового поколения в электрических сетях должно решить следующие проблемы:

- возможность продолжения использования существующего на станциях и подстанциях коммутационного оборудования при подключении дополнительных мощностей или подключении новых линий;
- отказ от секционирования электрических сетей 110 – 500 кВ, обеспечивающий повышение надежности работы системы;
- повышение надежности питания промышленных предприятий;
- повышение качества электроэнергии за счет уменьшения эквивалентного индуктивного сопротивления сети;

- повышение надежности работы электрооборудования за счет снижения электродинамических и тепловых воздействий при ограничениях ударных и установившихся токов КЗ;
- упрощение схем электроснабжения за счет возможности организации распределения электроэнергии с шин генераторного напряжения;
- уменьшение потерь электроэнергии и напряжения за счет замены традиционных токоограничивающих реакторов;
- снижение затрат при строительстве новых подстанций за счёт снижения требований к отключающей способности коммутационных аппаратов на присоединениях и, как следствие, возможность использования более дешевых выключателей на фидерах.

Таким образом по технико-экономической эффективности наиболее целесообразно ограничение токов короткого замыкания с применением вакуумных токоограничивающих устройств шунтирующего типа.

4.3 Расшифровка работ по выбранному проекту

План проекта

На данном этапе составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является линейный график реализации проекта, представленный в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Календарное планирование работ, утверждение плана	1	01.03.2018	02.03.2018	Руководитель, исполнитель

2	Выбор варианта решения поставленной задачи	38	02.03.2018	06.04.2018	Исполнитель
3	Выбор оборудования	14	06.04.2018	26.04.2018	Исполнитель
4	Подбор и закупка оборудования	14	26.04.2018	18.05.2018	Исполнитель

Для иллюстрации календарного плана проекта построена диаграмма Ганта, представленная на рисунке 4.1.

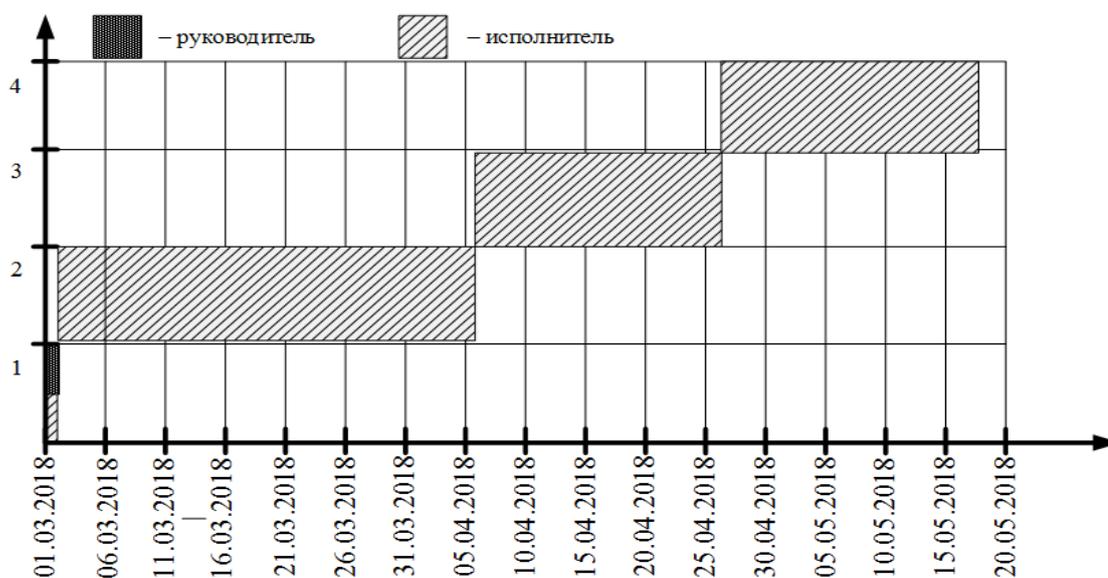


Рисунок 4.1 – Календарный план-график выполнения проекта

Выбор оборудования

К установке рекомендуется вакуумный выключатель Среднего класса напряжения 6–20 кВ ВВ TEL типа ISM15_Shell_2

Тип выключателя	ISM15_Shell_2
Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальный ток, А	2000
Номинальный ток отключения, кА	31,5
Механический ресурс, циклов В-О	30 000
Вес в зависимости от конструктивного исполнения, кг	50-56

Диапазон рабочих температур, °С	– 45...+55
Полное время отключения с учетом модуля управления, мс	58

Пофазный электромагнитный привод обладает повышенной надежностью по сравнению с выключателем с пружинным приводом ввиду наличия трёх приводов, соединенных синхронизирующим валом. Для успешной коммутации вакуумного выключателя достаточно двух действующих приводов. Также принцип работы ВВ/TEL на основе магнитной защелки исключает наличие дополнительных расцепителей, которые часто выходят из строя. Стоимость данного выключателя на сегодняшний день составляет 386 тыс. руб.

Расчет стоимости проектирования

Согласно локальной ресурсной ведомости ГЭСНм 08-01-058-02 при монтаже и наладке выключатель нагрузки с электромагнитным приводом необходимо произвести следующие работы:

1. Установка и регулировка выключателя.
2. Установка и регулировка привода.
3. Соединение выключателя с приводом.
4. Изготовление и установка тяг и тягоуловителей.
5. Присоединение.

В таблице представлены расчёты трудозатрат на выполнение монтажных работ.

Трудозатраты

№	Наименование	Ед. Изм.	Трудозатраты
1	Затраты труда рабочих-монтажников Разряд 4	чел.-ч	12,4
2	Затраты труда машинистов (справочно, входит в стоимость ЭМ)	чел.-ч	0,28
Итого по трудозатратам рабочих		чел.-ч	12,4

Оплата труда рабочих = 12,4 x 9,62	Руб.	119,29
Оплата труда машинистов = 5 (для начисления накладных и прибыли)	Руб.	5,00

Эксплуатация машин и механизмов

№	Шифр	Наименование	Ед. Изм.	Расход	Ст-сть ед.Руб.	Всего Руб.
1	021102	Краны на автомобильном ходу при работе на монтаже технологического оборудования 10 т	маш.-ч	0,13	134,65	17,50
2	030408	Лебедки электрические тяговым усилием 156,96 кН (16 т)	маш.-ч	0,15	131,44	19,72
3	400002	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 8 т	маш.-ч	0,13	107,3	13,95
Итого			Руб.	51,17		

Расход материалов

№	Шифр	Наименование	Ед. Изм.	Расход	Ст-сть ед.Руб.	Всего Руб.
1	101-1755	Сталь полосовая, марка стали СтЗсп шириной 50-200 мм толщиной 4-5 мм	т	0,00042	5000	2,10
2	101-1977	Болты с гайками и шайбами строительные	кг	0,42	9,04	3,80
3	101-2143	Краска	кг	0,03	28,6	0,86
4	101-2176	Шайбы квадратные	100 шт.	0,04	254	10,16
5	509-0156	Оконцеватели маркировочные	100 шт.	0,04	69	2,76
Итого			Руб.	19,67		

Итого по ресурсам:

Эксплуатация машин и механизмов + Расход материалов

51,17 + 19,67 = **70,84 руб.**

Всего по расценке:

Оплата труда рабочих + Оплата труда машинистов (для начисления накладных и прибыли) + Эксплуатация машин и механизмов + Расход материалов

119,29 + 5 + 51,17+19,67 = **195,13 руб.**

Значения расценки

Всего (руб.)	Оплата труда рабочих	Эксплуатация машин	Оплата труда машинистов	Стоимость материалов	Трудозатраты (чел.-ч)
195,13	119,29	51,17	5	19,67	12,4

Так как расценка учитывает ПЗ работы на **2000 год** (Московские цены), рассчитаны по ГЭСН образца **2009 года** к стоимости нужно применить индексацию перевода в текущие цены, учитывающий географическое расположение и инфляцию. Согласно приложению 1 к письму Минстроя РФ от 04.04.2018 г. № 13606-ХМ/09 «Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных и пусконаладочных работ по объектам строительства, определяемых с применением федеральных и территориальных единичных расценок, на I квартал 2018 года [без НДС] для Томской области прогнозный индекс к ФЕР-001/ТЕР-2001 по объектам строительства составляет 15,16. [36]

Значения расценки на 2018 год

Всего (руб.)	Оплата труда рабочих	Эксплуатация машин	Оплата труда машинистов	Стоимость материалов	Трудозатраты (чел.-ч)
2918,6032	1808,4364	775,7372	75,8	298,1972	12,4

Отчисления во внебюджетные фонды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot C_{\text{зп}} = 0,271 \cdot 1808,45 = 490,09$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). Данный коэффициент составляет 27,1% от затрат на компенсацию трудозатрат в целях хоздоговора.

Стоимость реализации проекта

Итого стоимость реализации проекта

$$C_{\text{оборудования}} + C_{\text{монтажных работ}} + C_{\text{внеб}} = 386\,000 + 2918,6 + 490,09 = 389\,401 \text{ руб}$$

4.4 Вывод по разделу

В разделе определены этапы работы и календарный график. Проведен сравнительный анализ всех возможных методов ограничения токов короткого замыкания. По технико-экономическим показателям выбран оптимальный способ ограничения токов КЗ. Оценены затраты на реализацию проекта, трудоёмкость реализации проекта.

Список литературы:

1. Окуловская Т.Я. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Т.Я. Окуловская, Т.Ю. Паниковская, В.А. Смирнов. 4-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. 85 с.
2. Ульянов С.А., Электромагнитные переходные процессы – М.,: ООО «ТИД «АРИС» 2010 – 520 с.
3. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.
4. Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во «Скан», 2015. – 1 Т. – 446 с.
5. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения в сетях 6(10) кВ / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков // Новости электротехники. – 2002. – № 5 (17). – С. 27–29.
6. Перенапряжения в электрических системах и защита от них: учебник для вузов / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ие, 1995. – 320 с.: ил.
7. Мастерова О.А., Барская А.В. Эксплуатация электроэнергетических систем и сетей: учебное пособие / О.А. Мастерова, А.В. Барская. – Томск: ТПУ, 2006. – 100 с.
8. Министерство энергетики российской федерации Правила устройства электроустановок пуэ шестое издание, дополненное с исправлениями – М. Госэнергонадзор 2000 507с
9. Окуловская Т.Я. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Т.Я. Окуловская, Т.Ю.

Паниковская, В.А. Смирнов. 4-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. 85 с.

10. Сазыкин В.Г. С15 Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков. – 2-е изд., исправ. и доп. - Краснодар: КубГАУ, 2017. – 255 с.

11. Школа для электрика / Статьи для электриков / Электроснабжение// URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/1479-ogranichenija-tokov-korotkogo.html>

12. Лоскутов А.В., Исследование ограничения токов короткого замыкания в электроэнергетических системах с помощью высокотемпературных сверхпроводящих токоограничителей индуктивного типа, Новосибирск 2004 – 124с.

13. Воронин В.А. Повышение эффективности управления нормальными и аварийными электрическими режимами в районах мегаполисов Иваново – 2014 148 стр

14. ЗАО Институт Энергетической Электроники, Бесконтактная коммутационная аппаратура в сетях 10/6/0,4 кВ. Разработка и опыт эксплуатации – Спб 2012 г. 17с.

15. Алферов Д.Ф. и др. Исследование коммутационных характеристик быстродействующего управляемого вакуумного выключателя в однофазном режиме Электротехника, 2010, №11, С. 2-10 (В файле 16 с.)

16. Набатов, К.А. Н133 Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств : учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.

17. Перенапряжения при коммутациях вакуумных выключателей / А.А. Базавлук, Л.И. Сарин, Г.Г. Михайловский, И.Е. Наумкин, В.В. Гоголюк // Энергоэксперт. – 2011. – № 2. – С. 27–32.

18. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников ; под ред. В.П. Горелова и В.Г. Сальникова. – Новосибирск: НГАВТ, 2013. – 559 с.

19. Левченко А.А. Подавление кондуктивных электромагнитных помех по импульсному напряжению в электрических сетях (6-10) кВ – Новосибирск 2009 – 161 с.

20. Кротенко Е. А. Техника высоких напряжений и электротехнические материалы: Конспект лекций Часть 2/ Е. А. Кротенко; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – 32 с.

21. Халилов Ф. Х. Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения – СПб 2013 – 80 с.

22. Ограничение внутренних перенапряжений с помощью управления моментами коммутации выключателей / К.П. Кадомская, Е.С. Несговоров, Л.В. Петракова, В.С. Пономарев // Электричество. – 1969. – № 9. – С. 10–13.

23. Снижение тока включения трансформаторов / В.А. Кузьменко, А.И. Лурье, А.П. Панибратец, В.С. Чуприков // Электротехника. – 1997. – № 2. – С. 22–27.

24. Управление коммутацией батарей статических конденсаторов в электроэнергетических системах / Р. Taillefer, Г.С. Нудельман, С.В. Балашов, Д.М. Журавлев // Релейщик. – 2014. – № 1. – С. 16–19.

25. Бунин Р.А. Управляемый вакуумный разрядник с высокой отключающей способностью – Москва 2014 – 167 с.

26. Шевцов Д.Е. Модели и методы управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения – Новосибирск 2017 – 151 с.

27. Электрические сети Управляемая коммутация выключателем с контроллером Switchsync URL: <http://leg.co.ua/stati/podstancii/upravlyaemaya-kommutaciya-vyglyuchatelem-s-kontrollerom-switchsync.html>

28. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : учеб. для студ. электротехн. и приборостроит. специальностей / Л.А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с.

29. Евдокунин, Г.А., Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и

эксплуатационные характеристики) / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2000. – 114 с.

30. Andersen E., Berneryd S., Lidahl S. Synchronous energizing of shunt reactors and shunt capacitors. //SIGRE Rep. No. 13-12, Paris 1988.

31. Д.Ф. Алферов, Г.С. Белкин, В.П. Иванов, Ю.Г. Ромочкин, В.А. Сидоров, Быстродействующие вакуумные аппараты с управляемой коммутацией // ЭЛЕКТРО. – 2006. - №1. - с. 14-18.

32. Терёхин В. В. Основы моделирования в MATLAB Часть2. Simulink Учебное пособие – Новокузнецк 2004 – 302 с.

33. ГОСТ 26522-85 Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения.

34. ГОСТ Р 52736-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания

35. СТО 56947007-29.130.10.095-2011. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. Указания по выбору: стандарт организации. – Введ. 2011.06.02. – Москва, 2011. – 28 с.

36. Письмо Минстроя РФ от 04.04.2018 г. № 13606-ХМ/09 «Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных и пусконаладочных работ по объектам строительства, определяемых с применением федеральных и территориальных единичных расценок, на I квартал 2018 года [без НДС] – 26 с.

37. И.Г. Видяев Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Креницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.