

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Валеев Рустам Галимянович

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В
ПРИ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Сидоров А.И.

Челябинск – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Краткая характеристика электрических сетей до 1000 В, содержащих воздушные линии электропередачи.....	10
1.2 Основные опасности, обусловленные возникновением однофазных коротких замыканий на воздушных линиях напряжением 380 В.....	20
1.3 Анализ существующих методов и средств защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий.....	24
1.3.1 Токовые защиты, реагирующие на токи, протекающие по фазным проводам.....	24
1.3.2 Защиты, реагирующие на ток, протекающий по нулевому проводу воздушной линии.....	27
1.3.3 Защиты, реагирующие на различные виды дифференциальных токов воздушной линии.....	30
1.3.4 Защиты, реагирующие на переходные и установившиеся процессы, протекающие в электрической сети при возникновении однофазных коротких замыканий.....	33
1.4 Задачи исследования.....	44
2 РАСЧЁТ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ ДО 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЁННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.....	46
2.1 Анализ методов расчёта токов однофазного короткого замыкания в сетях до 1000 В с глухозаземлённой нейтралью.....	46
2.2 Анализ факторов, влияющих на определение токов однофазного короткого замыкания.....	50
2.3 Уточнённая методика расчёта токов однофазного короткого замыкания в электрических сетях до 1000 В с глухозаземлённой нейтралью, выполненных воздушными линиями.....	66
2.4 Выводы.....	71

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 380 В С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ.....	72
3.1 Разработка компьютерной модели для исследования несимметричных режимов работы воздушной линии 380 В.....	74
3.2 Исследования на компьютерной модели режимных параметров электрической сети напряжением 380 В при однофазном коротком замыкании.....	88
3.3 Экспериментальные исследования на физической модели электрической сети.....	96
3.4 Разработка и описание опытной электрической сети.....	100
3.5 Исследование режимных параметров в опытной электрической сети при однофазных коротких замыканиях.....	110
3.6 Разработка методики и программы проведения экспериментальных исследований в действующих электрических сетях.....	118
3.7 Выводы.....	126
4 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В.....	128
4.1 Разработка методики выбора параметров и мест расстановки токовых защит воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий.....	128
4.2 Экспериментальная проверка разработанной методики расстановки токовых защит воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий.....	151
4.3 Внедрение средств защиты в действующих электрических сетях.....	153
4.4 Оценка технико-экономической эффективности результатов диссертационного исследования.....	158
4.5 Выводы.....	162
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	163

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	206
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	209
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	214
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	218
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	219
ПРИЛОЖЕНИЕ Л.....	220

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Анализ литературных источников показал, что в России эксплуатируются примерно 800 тыс. км воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 380 В. Это составляет почти треть (32,76 %) от общей протяженности электрических сетей напряжением 0,38–220 кВ. Из них свыше 50 % отслужили более 30 лет. Показатели надежности электроснабжения в связи с высоким износом распределительных электрических сетей напряжением 380 В за последние годы снижаются. По данным ОАО «Россети» по состоянию на 2013 г. в сетях напряжением 380 В в среднем за год происходит до 100 отключений на 100 км.

Одним из частых видов повреждений ВЛ напряжением 380 В являются однофазные короткие замыкания на нулевой рабочий провод и связанные с ним металлические конструкции (корпуса электрооборудования, заборы, гаражи, трубопроводы и т. д.). Возникающие при этом токи обуславливают появление опасных для людей и животных напряжений прикосновения и шага. Кроме того, они могут являться причиной возникновения пожаров.

Сегодня для защиты ВЛ от однофазных коротких замыканий в основном применяются плавкие предохранители и автоматические выключатели, устанавливаемые в начале воздушной линии. Известно, что зона действия данных аппаратов защиты в большинстве случаев не превышает 100–250 м от начала воздушной линии. В то же время для отдельных ВЛ электрических сетей напряжением 380 В характерны достаточно большая протяженность, достигающая 2000 м, и, как следствие, неэффективность работы токовых защит, основанных на применении плавких предохранителей и автоматических выключателей.

До появления седьмого издания Правил устройства электроустановок (ПУЭ) главным критерием выбора параметров плавких предохранителей и автоматических выключателей являлся коэффициент чувствительности, минимальное значение которого равнялось 3, что соответствовало времени срабатывания защиты с учетом разброса их защитных характеристик примерно 80 с. В ПУЭ седьмого

издания в качестве главного критерия эффективности работы аппаратов защиты принято время срабатывания, которое не должно превышать 5 с для сетей, питающих вводные распределительные устройства, распределительные щиты и т. д. Известные на сегодня методические рекомендации по выбору параметров и мест расстановки токовых защит опирались на требования предыдущих изданий ПУЭ, которые не соответствуют требованиям ПУЭ 7-го издания.

В настоящее время отсутствует методика выбора параметров и мест установки плавких предохранителей и автоматических выключателей по длине воздушной линии напряжением 380 В, применение которой обеспечивает время срабатывания токовых защит не более 5 с. Это создаёт предпосылки к принятию ошибочных решений по выбору параметров и места расстановки токовых защит в электрической сети как на этапе проектирования, так и эксплуатации. Поэтому создание новой методики выбора параметров и мест установки плавких предохранителей и автоматических выключателей является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы – повышение уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок путем разработки новой методики выбора параметров и мест расстановки плавких предохранителей по длине воздушных линий электропередачи напряжением 380 В, обеспечивающей время срабатывания защиты не более 5 с.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Выполнить анализ влияния различных факторов на величину тока однофазного короткого замыкания в воздушных четырехпроводных линиях напряжением 380 В и предложить необходимые изменения в методику расчета токов однофазного короткого замыкания.

2. Разработать компьютерную модель электрической сети напряжением 380 В, позволяющую проводить анализ работы этой сети как в нормальном, так и в аварийных режимах.

3. С учетом результатов, полученных на компьютерной модели, сформулировать требования к физической модели и опытной электрической сети, создать эти объекты и провести комплекс исследований режимных параметров на этих объектах.

4. Разработать методику выбора параметров и мест расстановки токовых защит, применение которой на стадии проектирования и при эксплуатации будет обеспечивать время их срабатывания не более 5 с.

Объект исследования – воздушные линии электропередачи напряжением 380 В в режиме однофазного короткого замыкания.

Предмет исследования – установление закономерностей в изменении тока однофазного короткого замыкания под воздействием различных факторов, позволяющих обосновать построение защиты воздушных линий электропередачи напряжением 380 В, отвечающих требованиям ПУЭ 7-го издания и тем самым обеспечивающих повышение уровня электробезопасности.

Методологическая и теоретическая основа исследования. В основу работы легли труды В. А. Андреева, А. В. Беляева, И. А. Будзко, Н. Д. Григорьева, И. О. Егорушкина, А. Б. Ослона, И. П. Крючкова, О. К. Никольского, П. И. Спевачева, И. Ф. Суворова, С. А. Ульянова, А. И. Якобса и др., внесшие значительный вклад в теорию расчета аварийных режимов в электрических сетях напряжением 380 В и построения защиты указанных электрических сетей. При проведении работы использованы фундаментальные положения теоретических основ электротехники, теории электробезопасности, а также методы компьютерного, физического моделирования и натурных испытаний.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются корректным применением известных методов расчета и анализа электрических цепей, экспериментальными исследованиями аварийных режимов работы электрической сети, корректным использованием вычислительных программных комплексов, удовлетворительной сходимостью данных компьютерного и физического моделирования с результатами экспериментов и измерений в опытной электрической сети напряжением 380 В.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

1. Предложен алгоритм расчета токов однофазного короткого замыкания, учитывающий эффект «теплого спада», сопротивление дуги в месте замыкания и сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора и ВЛ, что позволяет уточнить величину токов однофазного короткого замыкания.

2. Обоснована и построена компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В в программной среде Matlab-Simulink, отличающаяся возможностью задания параметров сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора и воздушной линии электропередачи напряжением 380 В.

3. Разработана методика выбора параметров и мест расстановки средств токовых защит в воздушной линии напряжением 380 В, применение которой на стадии проектирования и при эксплуатации обеспечивает время их срабатывания не более 5 с.

4. Выполнена оценка повышения уровня электробезопасности в электрических сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В при реализации разработанной методики выбора параметров и мест расстановки токовых защит в воздушной линии напряжением 380 В.

Практическая значимость работы и реализация её результатов:

1. Разработаны рекомендации по уточнению методики расчета токов однофазного короткого замыкания.

2. Разработанная методика выбора параметров и расстановки средств токовых защит передана филиалу «МРСК Урала» – «Челябэнерго» и используется им в процессе эксплуатации и проектировании электрических сетей напряжением 380 В, что подтверждается актом внедрения.

3. В электрической сети, обеспечивающей электроэнергией потребителей села Селезьян Еткульского района Челябинской области, проведена расстановка средств токовых защит в соответствии с разработанной методикой выбора параметров и мест расстановки токовых защит, что подтверждается актом использования.

4. Результаты исследований используются в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета при изучении курсов «Безопасность жизнедеятельности» студентами электроэнергетических специальностей, а также при подготовке специалистов по направлению «Техносферная безопасность».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.26.01 – «Охрана труда(электроэнергетика)», определяющей разработку методов контроля, оценки и нормирования опасных и вредных факторов производства, способов и средств защиты от них.

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на: V Международной научно-практической конференции «Безопасность в третьем тысячелетии» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012 г.), LI и LIII международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству» (ЧГАА, г. Челябинск, 2013 и 2014 гг.), VIII Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (ЧитГУ, г. Чита, 2013 г.), на ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ (г. Челябинск, 2013–2014 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных статей, в том числе 3 работы – в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы (145 наименований), десяти приложений. Содержит 180 страниц основного текста, в том числе 54 рисунка и 20 таблиц.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В общем балансе электрических сетей напряжением до 1000 В воздушные линии (ВЛ) составляют значительную долю. Они получили развитие в небольших городах и поселках. Основная доля ВЛ приходится на обеспечение сельской электрификации, исключение представляют только линии наружного освещения центральных магистралей крупных агропромышленных комплексов, которые выполняются, как правило, кабелями. Воздушные линии обладают многими преимуществами по сравнению с кабельными, среди которых следует отметить экономичность, простоту, наглядность, удобство эксплуатации и др. При относительно малых потоках мощности только требование архитектурного ансамбля (крупные города) или дефицитность площади наземного генплана (средние и крупные промышленные предприятия) заставляют отказаться от применения ВЛ.

К основным недостаткам ВЛ относятся пониженный уровень надёжности и электробезопасности. Вместе с тем следует отметить и то, что большой вклад в обеспечение электробезопасности на стадии проектирования и эксплуатации воздушных сетей напряжением до 1000 В внесли работы таких ученых, как В.А. Андреева, А.В. Беляева, И.А. Будзко, Н.Д. Григорьева, И.О. Егорушкина, А.Б. Ослона, И.П. Крючкова, О.К. Никольского, П.И. Спевакова, И.Ф. Суворова, С.А. Ульянова, А.И. Яковса и др. Однако, несмотря на многолетние исследования в данной области, задача обеспечения надлежащего уровня электробезопасности при эксплуатации ВЛ низкого напряжения до сих пор не решена.

1.1 Краткая характеристика электрических сетей до 1000 В, содержащих воздушные линии электропередачи

По данным [27] протяженность распределительных электрических сетей напряжением 380 В по России составляет 826000 км. Из них на долю кабельных ли-

ний, эксплуатируемых в сетях напряжением 380 В, приходится приблизительно 0,65% [114].

В таблице 1.1 представлены дифференцированные сведения о протяженности воздушных и кабельных линий различного класса напряжения, находившиеся на балансе ОАО «Россети» [86].

Таблица 1.1 – Данные о протяженности линий электропередачи напряжением 0,38–220 кВ

Класс напряжения, кВ	Суммарная протяженность линий электропередачи, км	Воздушные линии, км	Кабельные линии, км
220	3719	371070	13173
110–150	225238		
35	155286		
6–20	936534	845069,122	91464,878
0,4	712355	666194,05	46160,95
Общая протяженность:	2033132	1882333,172	150798,828

Анализ данных таблицы 1.1 показывает, что воздушные линии электропередачи напряжением 380 В (ВЛ 380 В) практически составляют треть (32,76 %) от общей протяженности сетей напряжением 0,38–220 кВ. Причем по сведениям, приведенным в [85], 53,8 % линий данного класса напряжения отработали более 30 лет.

Как указывается в [85, 86], показатели надежности электроснабжения в связи с высоким износом распределительных электрических сетей напряжением 380 В за последние годы снижаются. По состоянию на 2013 г. в сетях напряжением 380 В в среднем за год происходит до 100 отключений на 100 км [86], в то время как в 1992 г. было от 25,5 до 42,5 отключений [40].

Воздушные линии электропередачи напряжением 380 В преимущественно распространены в сельской местности, небольших городах и жилых поселках, а также на территориях средних и мелких промышленных предприятий, производственных базах и т. п. [4]. Так, например, линии электропередачи напряжением 380 В сельскохозяйственного назначения, как правило, должны быть воздушными [78]. Кабельные линии предусматриваются в случаях, когда по действующим Правилам устройств электроустановок (ПУЭ) [93] строительство воздушных линий электропередачи не допускается, а также для электроснабжения ответственных потребителей электроэнергии (животноводческие комплексы, птицефабрики и др.) и потребителей, расположенных в зонах с тяжелыми климатическими условиями (четвертый – особый район по гололеду) и ценных землях.

К электрическим сетям сельскохозяйственного назначения относятся сети напряжением 0,38–110 кВ, от которых снабжаются электроэнергией преимущественно (более 50 % по расчетной нагрузке) сельскохозяйственные потребители, включая коммунально-бытовые, объекты мелиорации и водного хозяйства, а также предприятия и организации, предназначенные для бытового и культурного обслуживания сельского населения [78].

Системам электроснабжения сельскохозяйственных потребителей присущи свои особенности: подвод электроэнергии к большому количеству сравнительно маломощных объектов; малая плотность электрических нагрузок и значительная протяженность электрических сетей; нестационарная несимметрия напряжения в течении суток и года из-за большой доли однофазных нагрузок; относительно небольшие величины токов короткого замыкания, обуславливающие сложности в обеспечении надежной и селективной защиты элементов системы электроснабжения [38, 143].

Воздушные распределительные линии трехфазного тока напряжением 380/220 В являются доминирующими среди воздушных низковольтных линий [7, 16, 17]. Применение системы напряжения 380/220 В обусловлено необходимостью одновременного питания трехфазных и однофазных токоприемников (двигателей, осветительных ламп, бытовых электроприборов и т.п.) от одного и того же

трансформатора. При более высоком номинальном напряжении сети резко возрастает опасность поражения электрическим током людей и животных, соприкасающихся с электроустановками [7]. Использование электрических сетей более низкого напряжения ощутимо увеличивает затраты на их сооружение и эксплуатацию. Так, расчеты показывают, что на сооружение сетей 380/220 В расходуется в два раза меньше металла на провода, чем при напряжении 220/127 В при одинаковых передаваемых мощностях [7].

Электрические сети напряжением 380 В преимущественно питаются от понижающих подстанций 6–10/0,4 кВ с трансформаторами мощностью от 25 до 630 кВА. В качестве трансформаторных подстанций 6–20/0,4 кВ мощностью 25–100 кВА применяются столбовые трансформаторные подстанции (ТП) с установкой их на опоре воздушных линий. Конструкция трансформаторов, применяемых для подстанций столбового исполнения, должна отвечать следующим основным требованиям [85, 86, 114, 119]:

- расчётный срок службы эксплуатации не менее 30 лет;
- герметичное исполнение, требующее минимум обслуживания;
- отсутствие радиаторного оребрения со стороны крепления к опоре;
- антивандальное исполнение;
- безопасность и экологичность.

Установка столбовых ТП обеспечивает упрощение схемы подключения. При мощности трансформаторной подстанции 160 кВА и более, с учётом климатических условий и места их установки, рекомендуется применять конструкции ТП 6–20/0,4 кВ закрытого исполнения или киоскового типа с воздушными и кабельными вводами. Трансформаторы мощностью до 160 кВА включительно следует принимать со схемой соединения Y/Z_n [78, 119] или с симметрирующим устройством [119].

В сельской местности основу составляют трансформаторные пункты малой мощности (до 100 кВА), преимущественно на столбовых конструкциях. Линии электропередачи напряжением 380 В от этих ТП должны сооружаться с применением СИП. Сооружение в сельской местности ТП с трансформаторами мощно-

стью 160–630 кВА допускается по отдельным решениям при наличии соответствующих обоснований [119].

Трансформаторные подстанции 6–10/0,4 кВ, как правило, однострансформаторные. Двухтрансформаторные подстанции применяются в следующих случаях [78, 143]:

- для электроснабжения потребителей первой категории по надежности;
- для потребителей второй категории, не допускающих перерыв в электроснабжении свыше 0,5 ч или имеющих расчетную нагрузку 250 кВт и более.

Электрические сети с ВЛ 380 В имеют значительное количество вариантов конструктивного исполнения. Это обусловлено различием проводниковых материалов (алюминий, медь и сталь), ведомственной или географической принадлежностью (город, сельская местность, промышленные предприятия и др.), типом применяемых опор (деревянные, железобетонные и металлические) и типом токоведущих частей (изолированные или неизолированные провода).

При сооружении электрических сетей с ВЛ 380 В преимущественно применяются деревянные опоры, пропитанные антисептиком, с железобетонными приставками или железобетонные опоры со стойками из вибрированного железобетона [34, 78, 85, 104, 114, 116, 119].

В качестве проводникового материала до внедрения самонесущих изолированных проводов (СИП), в основном, применялись алюминиевые провода марки А, АС и АЖ. Во вновь проектируемых и реконструируемых электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями электропередачи должны применяться самонесущие изолированные провода [93]. Однако протяженность электрических сетей напряжением 380 В, выполненных СИП, мала. Так, например, на 01.01.2014 г. по данным филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» общая протяженность ВЛ 380 В, состоящих на балансе «Челябэнерго», составляет 12629 км, из них немногим более 2 % выполнено СИПом. Учитывая, что 53,8 % ВЛ 380 В, принадлежащие ОАО «МРСК Холдинг», отслужили более 30 лет и темпы замены неизолированных проводов на СИП не велики, большая часть ВЛ 380 В остается с неизолированными проводами марки А и АС.

При строительстве подавляющего большинства ВЛ до 1000 В, введенных в эксплуатацию в нашей стране во второй половине XX века и действующих в настоящее время, использованы неизолированные провода, которые выполняются однопроволочными и многопроволочными. Многопроволочные провода гораздо надежнее в эксплуатации, чем однопроволочные, так как обрыв одной проволоки резко не снижает общую механическую прочность провода. Тем не менее, на низковольтных ВЛ допускается подвеска однопроволочных проводов. В основном провода для ВЛ до 1000 В изготавливаются из меди, алюминия, сталеалюминия. Гораздо реже применяются стальные провода, так как их электрическая проводимость существенно ниже, чем у меди и алюминия. Сталь, в отличие от цветных металлов, окисляется на открытом воздухе и покрывается ржавчиной. Ржавчина не защищает провод от дальнейшего разрушения, в то время как медные и алюминиевые провода на открытом воздухе покрываются тонкой оксидной пленкой, которая защищает их от внешних воздействий среды.

С точки зрения механической прочности ПУЭ запрещают применять провода, сечение которых меньше нормы. Минимальное сечение проводов зависит от материала провода, участка линии (магистраль, линейное ответвление и ответвление от ВЛ к вводу) и климатических условий эксплуатации (толщина стенки гололеда, ветровая нагрузка).

В зависимости от числа проводов и их назначения, участки линии могут быть полнофазными или неполнофазными. На полнофазном участке линии имеются фазные провода всех фаз и нулевой провод. Полнофазные линии применяются на головных участках и по всей длине линии при наличии трехфазной силовой нагрузки в конце линии или при значительной осветительной нагрузке [85]. Полнофазные линии системы напряжений 380/220 В могут выполняться в пяти- или четырехпроводном исполнении. Пятипроводная линия, помимо трех фазных и нулевого провода, имеет фонарный провод, что позволяет использовать ее и для наружного освещения.

На неполнофазном участке линии имеются фазные провода некоторых фаз и нулевой провод. Четырехпроводная неполнофазная линия 380/220 В имеет два

фазных провода, нулевой и фазный провод, на трехпроводной отсутствует один фазный или фазный провод. Неполнофазные участки применяются в конце линии и на ответвлениях с осветительной нагрузкой небольшой мощности [85].

В основном, в электрических сетях 380 В применяются одноцепные линии. Однако при необходимости прокладки в одном направлении двух отходящих линий может быть сооружена двухцепная линия. Двухцепные линии всегда являются полнофазными восьмипроводного исполнения [7].

Расположение проводов на опорах ВЛ может быть горизонтальным (в один ярус), вертикальным (друг над другом в два-три яруса) и смешанным, при котором вертикально расположенные провода смещены относительно друг друга горизонтально [104].

Важнейшими характеристиками воздушных линий являются суммарная длина и длина пролета линии между опорами.

Длина ВЛ, как правило, определяется на основе проектных данных, которые уточняются при строительстве и эксплуатации [143, 116]. Этот конструктивный параметр ВЛ зависит от номинального напряжения линии, от рельефа и климатических условий, а также от технико-экономических требований. Согласно [119] длина линии электропередачи ВЛ напряжением 380 В не должна превышать 500 м.

У реальных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) длина пролета между опорами является переменной величиной и определяется: расчетными климатическими условиями; величиной максимально допустимой стрелы провеса проводов; нормируемыми расстояниями до поверхности земли и пересекаемых сооружений; полезной высотой опоры и их механической прочностью [4].

Воздушные линии напряжением до 1000 В являются самым ненадежным звеном в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей [3, 28, 38, 103, 106]. Наряду с междуфазными короткими замыканиями (двух- и трехфазными), в сетях часто возникают однофазные замыкания вида «фаза-нуль» и «фаза-земля», а также обрывы фазных и нулевого проводов линии [38, 84]. Указанные повреждения приводят к перерывам в электроснабжении потребителей, выходу из

стройка бытовых электроприемников и создают электроопасные ситуации для людей и животных. Также однофазное короткое замыкание сопровождается появлением опасного потенциала на металлических конструкциях и частях оборудования, связанных с нулевым проводом, величина которого может привести к поражению электрическим током человека и животных.

В случае обрывов и замыкания любой из фаз на землю электропоражение происходит из-за случайного прикосновения к оборванным, лежащим на земле и находящимися под напряжением проводам линий электропередачи. Поскольку режим «фаза-земля» может существовать неопределенно долго, то вероятность случайного прикосновения к проводам оказывается значимой. Продолжительность режима короткого замыкания «фаза-земля» в воздушных сетях 380 В обуславливается тем, что аппараты защиты не реагируют на такой вид замыкания из-за незначительной величины тока замыкания, изменяющегося в пределах от долей до единиц и реже десятков ампер [38, 137].

Весьма опасным является обрыв нулевого провода ВЛ 380 В. В этом случае токи нагрузки потребителей, расположенных за местом обрыва, и подключенных между фазным и нулевым проводами протекают только через заземляющие контуры. В результате этого на корпусах электроприемников могут существовать опасные потенциалы. С другой стороны, такой режим, как правило, приводит к перенапряжениям и, как следствие, к возможному выходу из строя электроприёмников.

Изучение режимов работы ВЛ 380 В в России и за рубежом свидетельствует о том, что в рассматриваемых системах постоянно имеет место недопустимо большая несимметрия токов и напряжений [96]. Нагрузка, присоединяемая к сети 0,38/0,22 кВ, является смешанной, состоящей из трехфазных и однофазных приемников электроэнергии. Доля однофазных приемников, основными из которых являются бытовые приборы, нагревательные, сварочные и осветительные установки, в общей нагрузке велика. Потребляемая этими приемниками мощность, соизмеримая с мощностью трехфазной производственной нагрузки, меняется для отдельных потребителей по величине и во времени независимо. Следовательно,

так называемая случайная несимметрия является постоянно действующим фактором в нормальном режиме работы линии 0,38/0,22 кВ. Помимо случайной несимметрии в рассматриваемых системах имеет место неслучайная несимметрия, обусловленная неравномерным присоединением однофазных электропотребителей к трехфазной сети.

Согласно ПУЭ [93], устройство ВЛ напряжением до 1000 В в России предполагает наличие объединенного нулевого защитного и рабочего PEN-проводника, т.е. четырехпроводную воздушную линию с глухим заземлением нейтрали источника питания. При симметричном режиме работы линии нагрузки всех трех фаз одинаковы и ток, существующий в PEN-проводнике при нормальном (неаварийном) режиме, равен нулю (геометрическая сумма токов трех фаз). Поскольку для ВЛ 380 В в реальных условиях фазные токи неодинаковы, в нулевом проводе постоянно существует ток, называемый током несимметрии.

В 70-х годах XX века С.М. Рожавским и Ю.Ф. Свергуном были проведены измерения токов и напряжений в сельских сетях 0,38/0,22 кВ Украины (в то время – Украинской ССР) [97]. Исследования носили масштабный характер, измерениями были охвачены 15 районов электрических сетей двенадцати областей: Киевской, Черниговской, Житомирской, Винницкой, Донецкой, Ворошиловоградской, Днепропетровской, Крымской, Харьковской, Полтавской, Одесской и Николаевской. Измерения проводились в периоды весенне-летнего и осенне-зимнего дневных и вечерних максимумов нагрузки. Чтобы по возможности исключить неслучайную несимметрию, для измерений выбирались участки сетей, на которых периодически монтерскими бригадами выравнивались нагрузки путем максимально возможного равномерного распределения однофазных потребителей по фазам. В результате исследований было определено математическое ожидание тока в нулевом проводе, которое составило 54% от тока в наиболее загруженной фазе [97]. Исследования, проведенные в тот же период в шести областях Туркменской ССР, показали математическое ожидание тока в нулевом проводе, равное 46% от тока в наиболее загруженной фазе [96]. Еще более значительная величина тока несимметрии (61% от тока в средненагруженной фазе) отмечается в работе [8], измере-

ния которого проводились в линиях электрических сетей 0,38/0,22 кВ, отходящих от трансформаторных подстанций (г. Ереван).

Согласно п.1.7.57 ПУЭ 7-го издания электроустановки напряжением до 1 кВ жилых, общественных и промышленных зданий и наружных установок должны, как правило, получать питание от источника с глухозаземленной нейтралью с применением системы TN. Для защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении в таких электроустановках должно быть выполнено автоматическое отключение питания в соответствии с п. 1.7.78–1.7.79 ПУЭ. В п. 1.7.78 говорится о том, что характеристики защитных аппаратов и параметры защитных проводников должны быть согласованы, чтобы обеспечивалось нормированное время отключения поврежденной цепи защитно-коммутационным аппаратом в соответствии с номинальным фазным напряжением питающей сети. При этом для обеспечения автоматического отключения питания могут быть применены защитно-коммутационные аппараты, реагирующие на сверхтоки или дифференциальный ток. Поэтому сельские электрические сети напряжением 380 В, в основном, строятся по системе TN-C, где нулевой рабочий провод совмещает функции защитного проводника и в качестве защитных аппаратов применяются плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Согласно п. 1.7.79. в системе TN время автоматического отключения питания не должно превышать 5 с в цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки.

Учитывая особенности построения сельских электрических напряжением 380 В с воздушными линиями, рассмотрим основные опасности, возникающие в одном из наиболее частых видов аварийных режимов – однофазном коротком замыкании.

1.2 Основные опасности, обусловленные возникновением однофазных коротких замыканий на воздушных линиях напряжением 380 В

В сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью обеспечение электро- пожаробезопасности при замыкании одной из фаз на металлические нетоковедущие части достигается применением зануления, т.е. присоединения этих частей к неоднократно заземленному нулевому защитному проводнику (PEN) (рисунок 1.1). В этом случае однофазное замыкание на металлические нетоковедущие части, например, корпуса электроустановок, превращается в однофазное короткое замыкание (ОКЗ). Возникающий при этом ток ОКЗ вызывает срабатывание аппарата защиты (автоматического выключателя, плавкого предохранителя и т.п.).

Время срабатывания аппаратов защиты определяется величиной токов однофазного короткого замыкания. Если это замыкание происходит вблизи источника питания, то время отключения не превышает нескольких секунд. Подобное возможно, если длина воздушной линии, отходящей от источника питания, отвечает требованиям, указанным в п. 1.1.

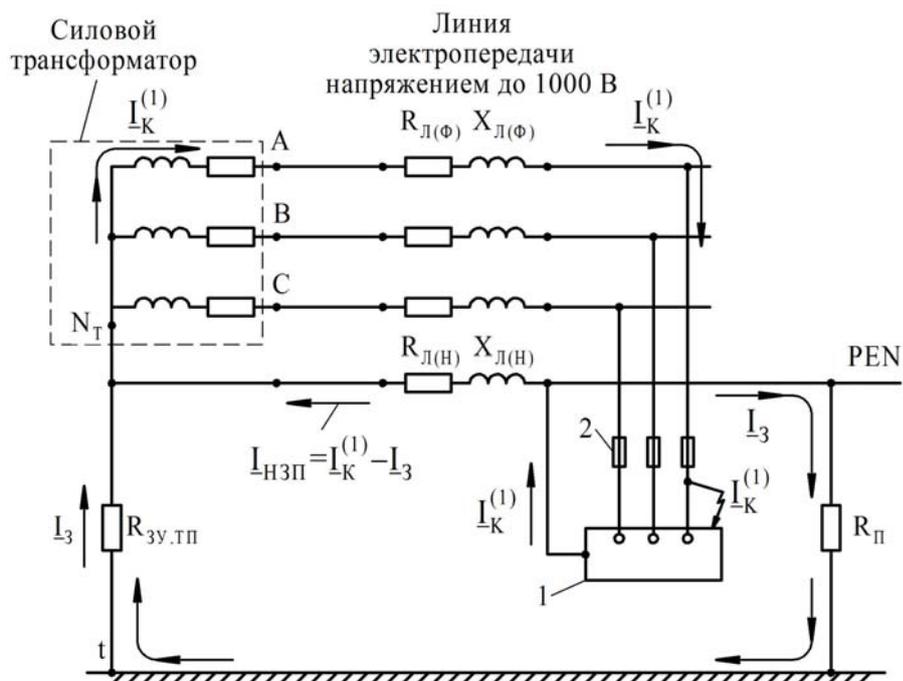


Рисунок 1.1 – Схема зануления в 3-х фазной четырехпроводной сети [107]:

1 – корпус электроприёмника; 2 – плавкий предохранитель

Однако проведенные на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета» (национального исследовательского университета) исследования показывают, что только 5 % воздушных линий отвечают этим требованиям [105]. В этом случае время отключения воздушных линий, где в качестве аппаратов защиты используются плавкие предохранители, например, типа ПН-2 может достигать 90 с [105], а в ряде случаев отключение и вовсе не произойдет.

В циркуляре № Ц-02-96(7) [132] отмечается, что по данным 65 энергосистем РФ ежегодно фиксируется более 25000 случаев отказов автоматических выключателей, в то числе и по причине несоответствия реальных токов ОКЗ расчетным значениям. Указанный недостаток зануления неоднократно анализировался в научно-технической литературе [73, 81, 87 и др.].

Предполагалось вести проверку защитных свойств зануления на основании вычисления такого критерия безопасности как количество электричества, протекающего через тело человека за время действия $Q = I_h \cdot t$ [131], определяя при этом предельно допустимую длину линии, при которой $Q_p \leq Q_{\text{доп}}$ ($Q_{\text{доп}} = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$). Однако на практике ни на стадии проектирования, ни на стадии эксплуатации такое предложение не может быть реализовано, поскольку оно либо не учитывает требования технологического процесса, либо значительных затрат на реконструкцию существующей электрической сети.

В [82] устранение отмеченных недостатков предлагается решать путём применения комплексной защиты от токов нулевой последовательности и токов утечки. Первая из них осуществляет защиту от ОКЗ, вторая – от замыканий одной из фаз на землю.

Для реализации первого варианта защиты необходимо отстраиваться от тока несимметрии, обусловленного неравномерным распределением токов нагрузки по фазам. Однако решение такой задачи является чрезвычайно сложным из-за практической невозможности рассчитать этот ток как при проектировании, так и эксплуатации электрической сети, в силу влияния на него множества факторов, часть из которых носит случайный характер.

Второй вариант защиты в настоящее время успешно реализован для внутренних сетей, например, квартирных, путем установки устройств защитного отключения. Но при замыкании одной из фаз воздушной линии на землю этот вариант успеха не имеет. Здесь необходимы иные решения.

Автор работы [67], обращая внимание на статистические данные электропоражений при возникновении ОКЗ в электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью, предлагает вести расчет зануления исходя из необходимости обеспечения допустимых значений напряжения прикосновения и времени воздействия электрического тока на человека.

Не опровергая ошибочности такого подхода, следует отметить, что установленные в настоящее время предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов через тело человека, ориентированы на идеальные формы токов, что не соответствует реальным условиям. Известно [108], что искажение формы тока усиливает его отрицательное воздействие на организм человека, в связи с чем предлагаемое решение в [82] не было реализовано.

В работах [5, 6, 31] приводятся обоснования необходимости учета параметров заземляющих устройств в схеме зануления при расчете ожидаемых токов ОКЗ в воздушных линиях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью. Указанные работы уточняют методику расчета токов ОКЗ: путем введения коэффициента «отсоса», принимаемого согласно [31] равным 1,3 и поправочных коэффициентов [6]. Указанные коэффициенты учитывают ответвление и замыкание части тока ОКЗ через заземляющие устройства как нулевых проводов параллельно работающим линиям, так и заземляющие устройства линии, где произошло ОКЗ. Причём в [6] показано, что погрешность от пренебрежения параметрами заземляющих устройств может достигать 16 %.

Иной подход к выполнению зануления предлагается в [12]. Автор, основываясь на расчете заземляющих устройств по допустимому напряжению прикосновения, предлагает проводить расчет зануления исходя из указанного напряжения. Ранее нами уже указывалось на идеальность предельно допустимых уровней напряжений прикосновения. Кроме того, как указывает сам же автор [12], при выда-

че заданий на разработку технологической и строительной частей объектов следует указывать требования к электрическим свойствам покрытий машин, механизмов, конструкции, полов помещений и площадок обслуживания.

В [101] показано, что при отказе аппарата защиты в схеме зануления и значении сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений указанных в ПУЭ 7-го издания, величина напряжения нулевого защитного проводника относительно земли остается неизменной при всех нормированных напряжениях в сети и составляет $0,714U_{\Phi}$, что представляет угрозу для персонала, населения, а в сельской местности – и для животных.

Следует отметить, что указанное значение напряжения $0,714U_{\Phi}$ получено для самого неблагоприятного случая, а именно: корпус, подключенный к нулевому защитному проводнику не имеет каких-либо гальванических связей ни с нейтралью источника питания, ни с землей.

Выполненный краткий анализ опасностей, возникающих при появлении однофазных коротких замыканий на воздушных линиях напряжением до 1000 В, где нейтраль источника глухо заземлена, а основным средством обеспечения электробезопасности является зануление, показывает, что общепринятая методика расчета токов ОКЗ в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью [37] нуждается в уточнении. Доработка этой методики позволит более обоснованно выбирать аппараты защиты в схеме зануления и тем самым исключить возможные отказы этих аппаратов по причине недостаточности токов ОКЗ для срабатывания защиты.

Для защиты от ОКЗ воздушных линий, протяженность которых существенно превышает регламентированную длину [86], необходимо с учетом особенностей линий и потребителей электрической энергии разработать такие предложения, реализация которых могла бы быть осуществлена в короткие сроки и не требовала бы значительных капитальных затрат.

Указанные задачи требуют своего решения и разработки путей их реализации с использованием применяемых в настоящее время средств защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий.

1.3 Анализ существующих методов и средств защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий

Проведенный обзор научно-технической литературы [46, 63, 66, 70, 76, 113, 121, 129, 130, 136] позволил разделить, применяемые в сельских электрических сетях с воздушными линиями напряжением 380 В защиты от ОКЗ по принципу действия на следующие группы, реагирующие на:

- на сверхтоки, протекающие по фазным проводам;
- на ток, протекающий по нулевому проводу;
- на различные виды дифференциальных токов;
- на переходные и установившиеся процессы, протекающие в электрической сети при возникновении ОКЗ.

Первые три вида защит по принципу действия относятся к классу токовых, четвёртый вид включает защиты, которые реагируют не только на изменения токов, протекающих в электрической сети, но и на другие величины или сигналы.

Рассмотрим подробнее принцип построения и работу указанных защит.

1.3.1 Токовые защиты, реагирующие на токи, протекающие по фазным проводам

К данной группе относятся защиты от ОКЗ, основанные на применении широко распространенных плавких предохранителей и автоматических выключателей, подключенных в рассечку фазных проводов ВЛ.

Защиты, основанные на применении плавких предохранителей. Плавкая вставка предохранителя является простейшей токовой защитой с обратной зависимостью от тока характеристикой выдержки времени. Она должна защищать элементы системы электроснабжения от токов КЗ и от длительной перегрузки.

В ПУЭ 6-го издания [92, п. 1.7.79] и более ранних его изданиях, эффективность защиты плавкими предохранителями определялась по коэффициенту чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{Ф.Н}}} \geq 3, \quad (1.1)$$

где $I_{\text{к.мин}}$ – минимальное значение тока двухфазного или однофазного на нулевой провод короткого замыкания в конце защищаемой линии, А;

$I_{\text{Ф.Н}}$ – номинальный ток плавкой вставки, А.

Токовые защиты, построенные с использованием плавких предохранителей, вследствие их простоты исполнения, удобства эксплуатации и относительной дешевизны широко распространены. В тоже время они обеспечивают защиту от однофазных коротких замыканий лишь на расстоянии не более 250–350 м от начала воздушной линии.

Для повышения эффективности этих токовых защит было предложено секционировать воздушную линию, т.е. разбивать её на участки и в начале каждого из них устанавливать защитные аппараты (плавкие предохранители и автоматические выключатели). Это предложение сформулировано в работах П.И. Спешакова [110–113], первая из которых опубликована ещё в 1939 г. Эти предложения были использованы в «Методических указаниях по выбору устройств релейной защиты в сетях 0,38–35 кВ сельскохозяйственного назначения» выпуска 1976 и 1996 годов, разработанных институтом «Сельэнергопроект» [70, 76], и в «Пособии по проектированию городских и поселковых электрических сетей» 1987 года выпуска, разработанного институтом «Гипрокоммунэнерго» [89].

Основная идея секционирования заключается в установке защитного аппарата (плавкого предохранителя или автоматического выключателя) в расщелку фазных проводов ВЛ 380 В на таком расстоянии от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, чтобы соблюдались условие (1.1) и максимальный рабочий ток защищаемого участка ВЛ 380 В был меньше или равен току плавкой вставки. Следует отметить, что методики выбора параметров секционирующих плавких предохранителей и автоматических выключателей, изложенные в [70, 89, 113], ориентированы на значение коэффициента чувствительности $K_{\text{ч}} = 3$.

В тоже время, согласно действующим «Правилам устройства электроустановок» 7-го издания [93], эффективность работы защиты определяется не только

коэффициентом чувствительности, но временем её срабатывания. В п. 1.7.79 ПУЭ 7-го издания указывается на то, что время срабатывания защиты должно быть не больше 5 с. Поэтому требуется разработка новой методики выбора параметров секционирующих защитных аппаратов, учитывающей требования 7-го издания ПУЭ, и определения мест их расположения в линии.

Следует отметить, что предохранители достаточно надежно и эффективно защищают ВЛ при условии, когда их число при движении от конца каждого ответвления ВЛ до питающей подстанции не превышает 2–3, и если ток аварийного или ненормального режима по крайней мере в пять – семь раз больше номинального тока плавкой вставки предохранителя. При таких условиях правильно выбранные по своим характеристикам предохранители могут обеспечить избирательное отключение именно поврежденного участка сети [32].

Защиты, основанные на применении автоматических выключателей. Автоматические выключатели предназначены для автоматического отключения электрических цепей при перегрузках электрической сети или возникающих в ней КЗ. Отключение выключателя при перегрузках и КЗ осуществляется встроенным в выключатель автоматическим устройством, которое называется максимальным расцепителем тока, или сокращенно – расцепителем [13, 112]. Расцепители могут быть прямого действия (электромагнитные, тепловые) и косвенного действия (полупроводниковые, микропроцессорные). Комбинацию из электромагнитного и теплового расцепителей называют комбинированным расцепителем.

Коэффициент чувствительности теплового расцепителя определяется по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{р.т}}} \quad (1.2)$$

где $I_{\text{к.мин}}$ – минимальное значение тока двухфазного или однофазного на нулевой провод короткого замыкания в конце защищаемой линии, А;

$I_{\text{р.т}}$ – номинальный ток теплового расцепителя.

Согласно ПУЭ 6-го издания коэффициент чувствительности должен быть не менее трех. Если данное условие не выполняется, то необходимо секционирова-

ние воздушной линии как и в случае защиты ВЛ с плавкими предохранителями [76].

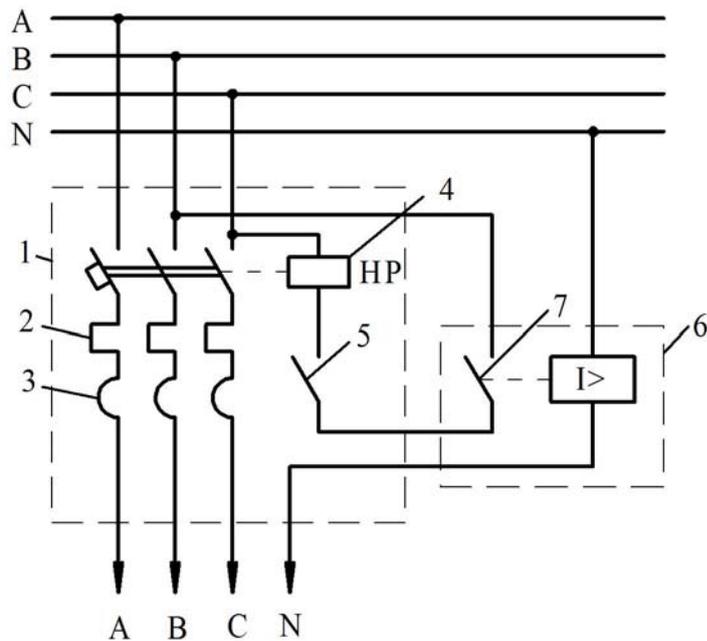
1.3.2 Защиты, реагирующие на ток, протекающий по нулевому проводу воздушной линии

Данная группа аппаратов защиты реагируют на значительное увеличение величины тока в нулевом рабочем проводе при возникновении однофазного короткого замыкания. Учитывая особенности работы сельских электрических сетей напряжением 380 В, уставка срабатывания этих аппаратов должна отстраиваться от тока в нулевом рабочем проводнике $I_{НП}$, который возникает вследствие несимметрии электрических нагрузок фаз в нормальном режиме работы. Максимальная величина этого тока может достигать 50 % [38] максимального фазного тока $I_{Р.МАКС}$.

Если ток в нулевом рабочем проводнике $I_{НП}$ превышает $0,5 \cdot I_{Р.МАКС}$, то это может говорить о возникновении какого-либо ненормального режима работы сети, например, замыкания фазного провода на нулевой провод (ОКЗ). К аппаратам защит, реагирующим на ток в нулевом проводе, относятся токовое реле РЭ-571Т или РЭ13-2, включенные в нулевой провод, и автоматический выключатель со встроенным расцепителем максимального тока в нулевом проводе типа АП50-2МЗТО.

На рисунке 1.2,а приведена принципиальная электрическая схема защиты, реагирующей на ток, протекающий по нулевому рабочему проводнику, с применением токового реле РЭ-571Т.

Автоматический выключатель 1 с тепловым 2 и электромагнитным 3 расцепителями обеспечивает защиту воздушной линии от токовых перегрузок и токов КЗ. Автоматический выключатель может быть любого типа, например А3124, А3144, АЕ20, А3700ФУЗ и ВА [16, 17, 113]. Он должен содержать независимый расцепитель 4, который включается последовательно с нормально открытым блок-контактом 5 этого выключателя.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Защита, построенная на токовым реле включенным в рассечку нулевого провода: а – принципиальная электрическая схема защиты;

б – внешний вид реле РЭ-571Т

Реле максимального тока 6 типа РЭ-571Т включается в нулевой рабочий проводник. Нормально разомкнутый контакт 7 реле включается в цепочку независимого расцепителя 4, которая включена на линейное напряжение сети.

Ток срабатывания реле РЭ-571Т выбирается по условию отстройки от тока в нулевом проводе, обусловленного несимметрией нагрузок фаз ВЛ, с коэффициентом запаса 1,4 [70, 113]. При осветительной или другой нагрузке, обусловленной однофазными токоприемниками, величина тока может достигать $0,5 \cdot I_{P.MAKC}$. Тогда ток срабатывания реле РЭ определяется выражением:

$$I_{P.Э} = 1,4 \cdot 0,5 \cdot I_{P.MAKC} = 0,7 \cdot I_{P.MAKC} \quad (1.3)$$

Коэффициент чувствительности токовой защиты нулевой последовательности определяется выражением:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К.МИН}}^{(1)} - I_{\text{Р.МАКС}}}{I_{\text{Р.Э}}} \geq 1,5, \quad (1.4)$$

где $I_{\text{К.МИН}}^{(1)}$ – минимальный ток ОКЗ в самой удаленной точке ВЛ 380 В – в конце зоны защиты.

При включенном выключателе 1 и замкнутом его блок-контакте 5 в случае превышения током в нулевом рабочем проводе $I_{\text{НП}}$ тока уставки $I_{\text{Р.Э}}$ срабатывает реле РЭ-571Т, замыкая свой контакт 7 в цепи независимого расцепителя 4, который, в свою очередь срабатывая и воздействуя на механизм расцепления выключателя 1, обеспечивает отключение выключателя 1, обесточивающего воздушную линию с возникшим ненормальным режимом работы.

На рисунке 1.3 приведена принципиальная схема автоматического выключателя типа АП50-2МЗТО и его внешний вид. Обозначение 2МЗТО показывает, что эти выключатели имеют два электромагнитных расцепителя, три тепловых расцепителя и один расцепитель максимального тока в нулевом проводе.

Автоматический выключатель 1 имеет четырёхполюсное исполнение. В четвертом полюсе выключателя расположен независимый расцепитель токового типа, который непосредственно включается в нулевой рабочий провод. Этот независимый расцепитель выполняет ту же функцию, что и реле РЭ-571Т.

Принцип работы защиты от токов ОКЗ с помощью автоматические выключатели типа АП50-2МЗТО, заключается в действии расцепителя максимального тока, установленного в четвертом полюсе выключателя, на механизм свободного расцепления при превышении тока в нулевом проводе тока уставки.

Ток срабатывания максимального расцепителя, включенного в нулевой провод, согласно [76] принимается равным $1,4 \cdot I_{\text{Р.МАКС}}$. Коэффициент чувствительности такой защиты определяется по условию:

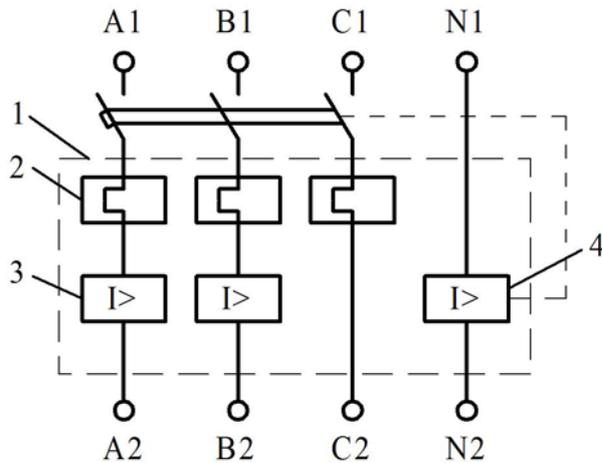
$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К.МИН}}^{(1)}}{1,4 \cdot I_{\text{Р.МАКС}}} \geq 1,5, \quad (1.5)$$

из которого следует, что для исключения ложных срабатываний защиты, использующей в качестве информации ток в нулевом проводе, минимальный ток однофазного короткого замыкания должен удовлетворять требованию

$$I_{\text{К.МИН}}^{(1)} \geq 1,5 \cdot 1,4 \cdot I_{\text{Р.МАКС}} = 2,1 \cdot I_{\text{Р.МАКС}}, \quad (1.6)$$

а согласно [39] он должен превышать максимальный рабочий ток линии в 2,5 раза

$$I_{\text{К.МИН}}^{(1)} \geq 2,5 \cdot I_{\text{Р.МАКС}}.$$



а)



б)

Рисунок 1.3 – Защита от ОКЗ, построенная на автоматическом выключателе со встроенным расцепителем максимального в четвертом полюсе:

а) принципиальная электрическая схема автоматического выключателя АП50-2МЗТО: 1 – автоматический выключатель; 2 – тепловой расцепитель; 3 – электромагнитный расцепитель; 4 – расцепитель максимального тока в нулевом проводе; б) общий вид автоматического выключателя АП50-2МЗТО

По данным [16, 76, 113] автоматические выключатели типа АП50-2МЗТО получили широкое распространение для защиты от токов ОКЗ в КТП мощностью 25, 40 и 63 кВА.

1.3.3 Защиты, реагирующие на различные виды дифференциальных токов воздушной линии

К защите, реагирующей на различные виды дифференциальных токов воздушной линии, относится защита ЗТИ-0,4, выпускавшаяся Опытно-конструкторским предприятием (ОКП) Украинского отделения института «Сельэнергопроект». Данная защита представляет собой приставку к автоматическим

выключателям серий А3100 и А3700, устанавливаемым в КТП напряжением 6–10/0,4 кВ. Она серийно выпускалась Пятигорским опытным заводом ПО «Союзэнергоавтоматика».

Устройство ЗТИ-0,4 (рисунок 1.4) было предназначено для установки в КТП 6–10/0,4 кВ мощностью 63, 100 и 160 кВА, оснащенных автоматическими выключателями, имеющими независимый расцепитель [16, 17]. Устройство ЗТИ-0,4 рассчитано на защиту воздушных линий напряжением 380 В с рабочими токами 63, 100, 160 А.

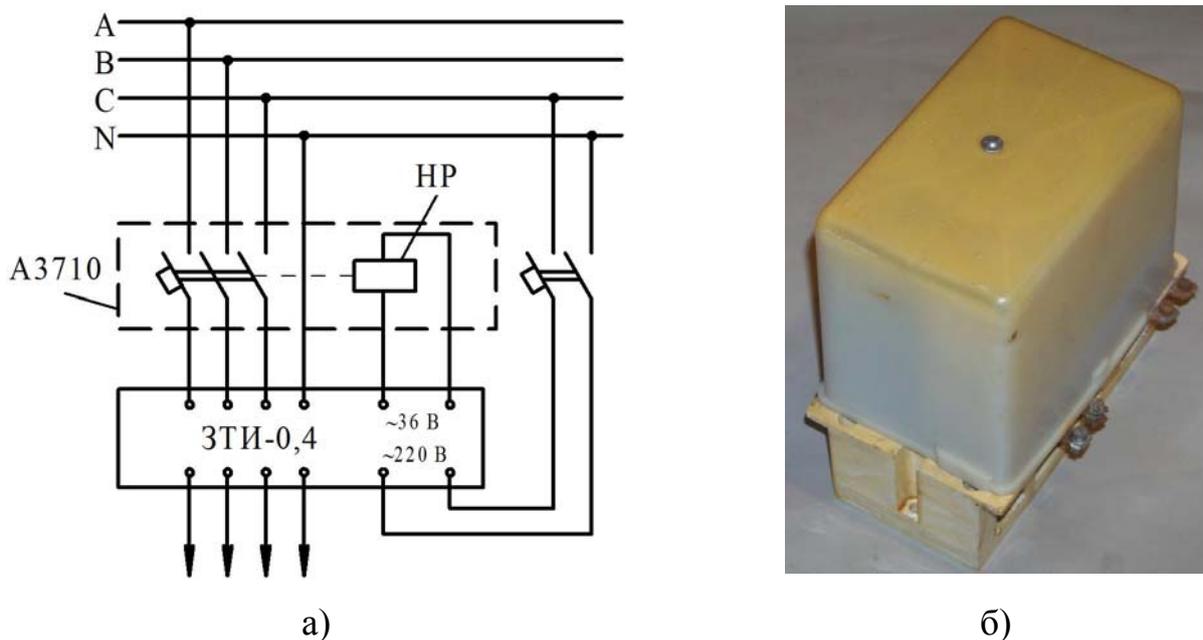


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема включения токовой защиты ЗТИ-0,4 и её внешний вид

Основное назначение защитной приставки ЗТИ-0,4 являлась защита трехфазных четырёхпроводных воздушных линий напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью питающего трансформатора и повторными заземлителями нулевого провода от междуфазных и однофазных на нулевой провод коротких замыканий, а также от однофазных замыканий фаз на землю. Электрическая схема подключения ЗТИ-0,4 к распределительному устройству 0,4 кВ показана на рисунке 1.4, а. Для подключения к линии ЗТИ-0,4 имеет четыре токовых входа, через которые пропускают три фазных и нулевой провода линии. Защита действует на независимый расцепитель автоматического выключателя А3710.

На рисунке 1.5 приведена функциональная блок-схема защиты типа ЗТИ-0,4.

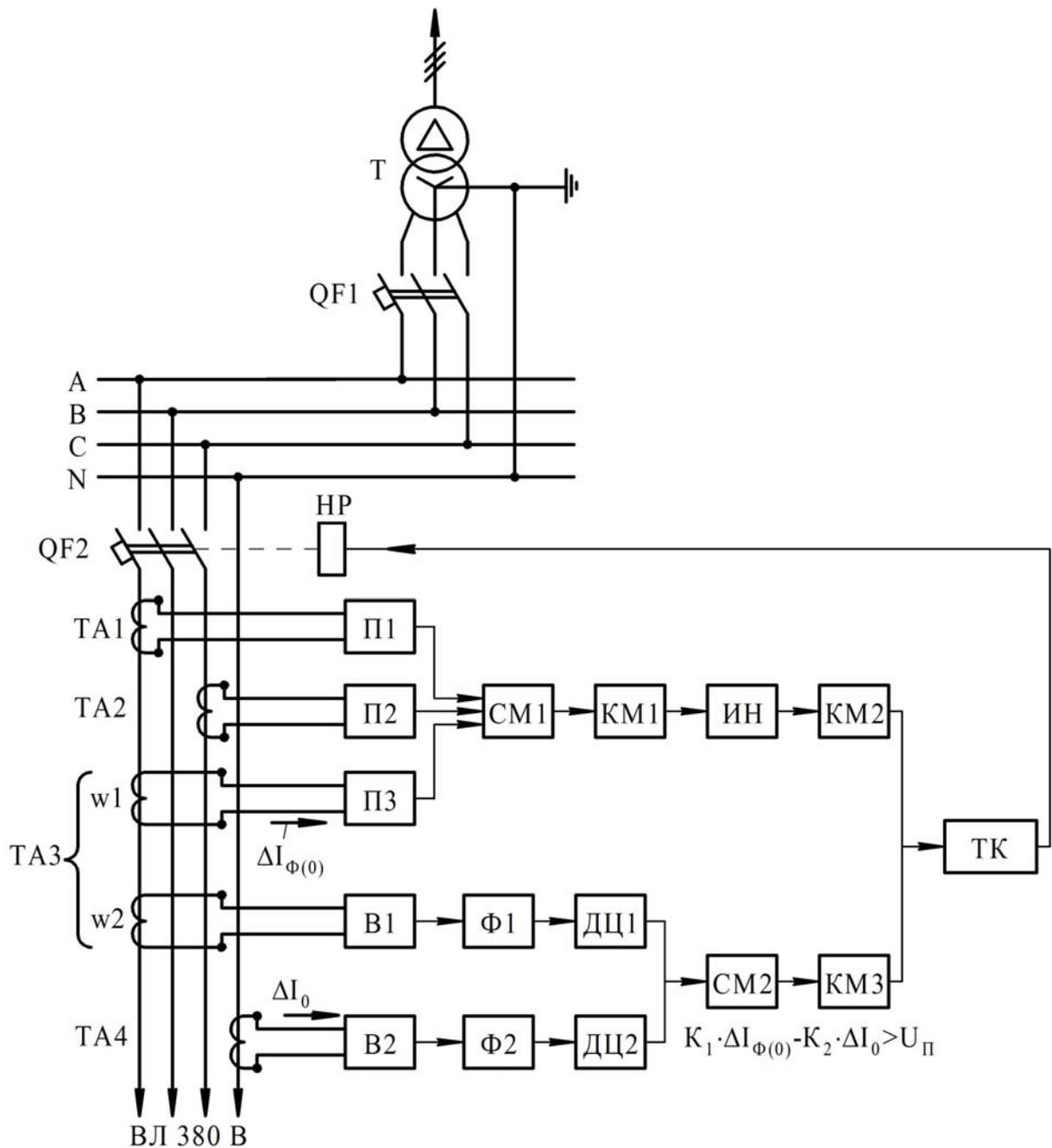


Рисунок 1.5 – Функциональная блок-схема защиты типа ЗТИ-0,4

Защита содержит:

- максимальную токовую защиту от междуфазных коротких замыканий;
- токовую защиту нулевой последовательности от удалённых однофазных коротких замыканий;
- защиту от однофазных замыканий на землю.

Для действия этой защиты используется дифференциальный трансформатор тока ТАЗ, магнитопровод которого охватывает все три фазных провода воздушной линии. Трансформатор тока ТАЗ является фильтром токов нулевой последовательности, которые появляются при однофазных коротких замыканиях – замыканиях одной из фаз на нулевой провод

$$\Delta I_{\Phi(0)} = I_{A,\Phi} + I_{B,\Phi} + I_{C,\Phi} = 3 \cdot I_0 \quad (1.7)$$

где $\Delta I_{\Phi(0)}$ – дифференциальный ток (обозначение, принятое разработчиками);

$I_{A,\Phi}$, $I_{B,\Phi}$, $I_{C,\Phi}$ – фазные токи воздушной линии;

I_0 – ток нулевой последовательности.

Следовательно, если ток удалённого однофазного короткого замыкания превысит значение соответствующей уставки защиты ЗТИ-0,4, то это приведёт к отключению автоматического выключателя, установленного в начале линии.

Ток срабатывания защиты от однофазных КЗ на нулевой провод определяется по условию отстройки от наибольшего значения тока небаланса $I_{НБ}$, равного половине максимального тока нагрузки линии $I_{P,МАКС}$, с коэффициентом надёжности $K_{Н.С} = 1,2$ [16, 17].

1.3.4 Защиты, реагирующие на переходные и установившиеся процессы, протекающие в электрической сети при возникновении однофазных коротких замыканий

Защита, реагирующая на длительность бросков токов нулевой последовательности. В [2, 66] для идентификации тока однофазного короткого замыкания предложено использовать не значения тока нулевой последовательности, а характеристики переходных процессов при появлении этого тока – его броски или скачкообразные изменения, вызываемые переходным процессом, и длительности появления тока ОКЗ.

Подобные переходные процессы могут возникать также при включении и отключении однофазных электроприемников. Однако характеристики таких переходных процессов имеют другие параметры. Мощность одиночных однофазных

электроприемников обычно значительно меньше суммарной мощности, присоединенной к фазе линии. Поэтому скачкообразные изменения тока нулевой последовательности, обусловленные их включением и отключением, имеют незначительную величину по сравнению с возможной величиной рабочих токов фаз и токов рабочей несимметрии. Кроме того, переходные процессы при этом имеют небольшую длительность. Путем отстройки от этих процессов представляется возможным идентифицировать ток однофазного короткого замыкания.

На рисунке 1.6 приведена функциональная схема устройства защиты от однофазных коротких замыканий, реагирующей на длительность бросков токов нулевой последовательности, а на рисунке 1.7 показаны эпюры токов и напряжений защиты.

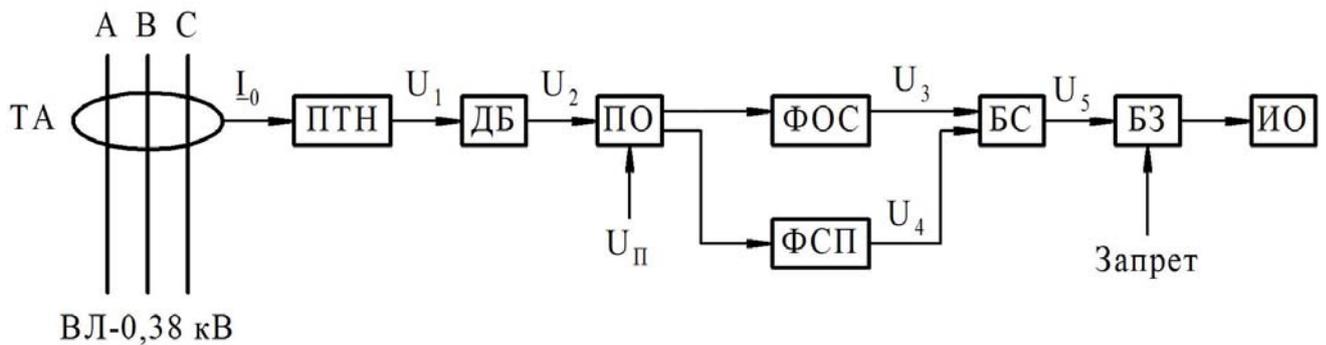


Рисунок 1.6 – Функциональная схема устройства защиты от ОКЗ, реагирующей на длительность бросков токов нулевой последовательности

Устройство получает информацию от трансформатора тока нулевой последовательности ТА, через который проходят три фазных провода ВЛ. На вторичной обмотке трансформатора тока ТА выделяется ток нулевой последовательности I_0 , который преобразователем ток-напряжение ПТН преобразуется в выпрямленное напряжение U_1 , пропорциональное току I_0 . Выпрямленное напряжение подается на дифференцирующий блок ДБ, на выходе которого появляются импульсы напряжения U_2 , величина которых определяет скорости изменения выпрямленного напряжения U_1 . Пороговый орган ПО сравнивает по величине импульсы напряжения U_2 с пороговым напряжением $U_{\text{П}}$, соответствующим уставке по току устройства защиты $I_{\text{П}}$. Если импульсы напряжения U_2 больше порогового напря-

жения U_{Π} , то эти импульсы подаются на входы формирователя опорного сигнала ФОС и формирователя сигнала повреждения ФСП. Длительность Δt_{3AD} выходного напряжения U_3 формирователя ФОС имеет строго заданное значение – формирователь ФОС выполнен в виде ждущего мультивибратора. Длительность Δt_0 выходного напряжения U_4 формирователя ФСП равна длительности изменения тока нулевой последовательности I_0 и, соответственно, напряжения U_1 – формирователь ФСП выполнен в виде триггера. Блок сравнения БС сравнивает длительности напряжений U_3 и U_4 и при выполнении условия $\Delta t_0 > \Delta t_{3AD}$ через блок запрета БЗ выдаёт сигнал на вход исполнительного органа ИО.

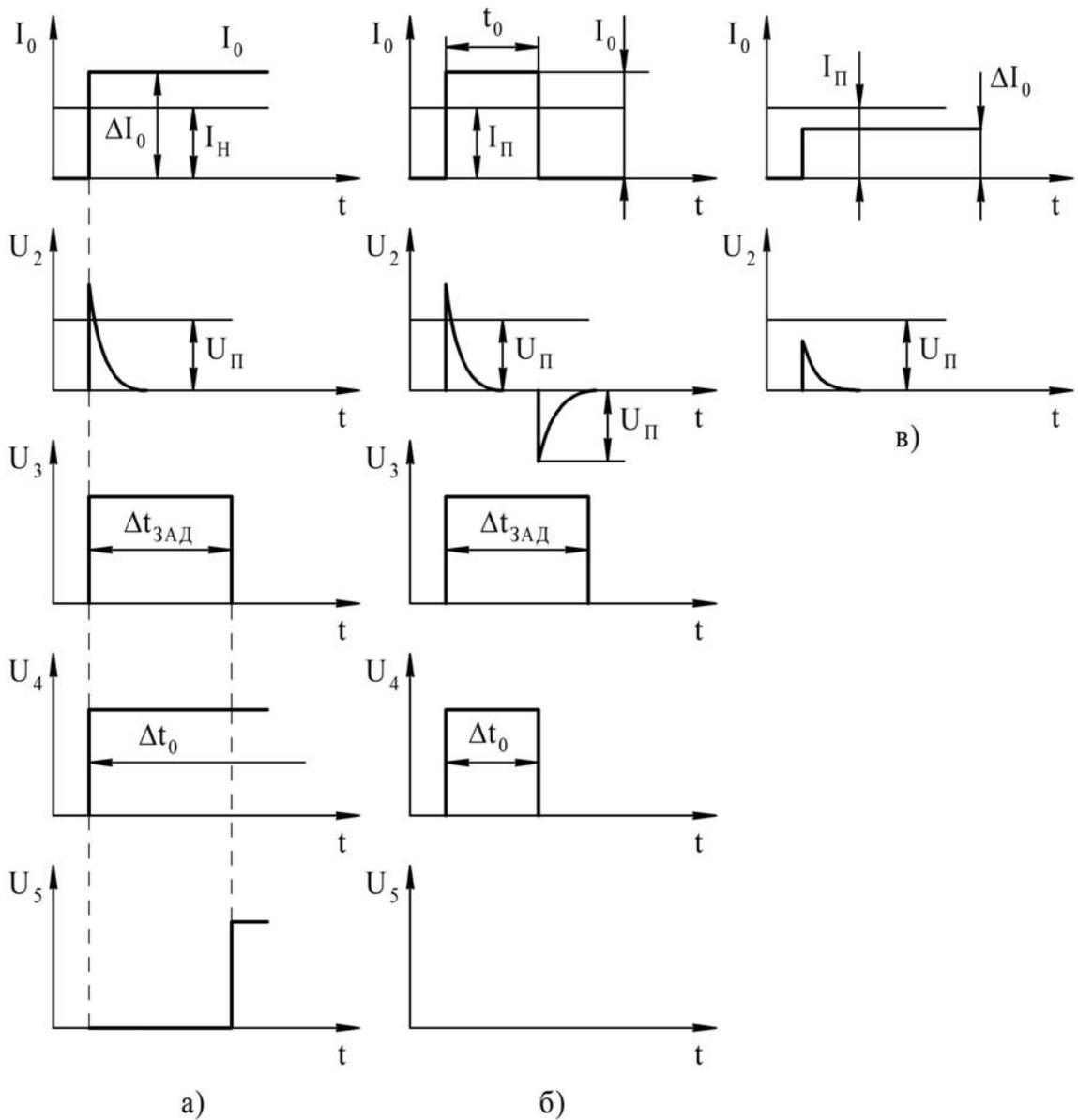


Рисунок 1.7 – Эпюры токов и напряжений защиты

Работа устройства поясняется эпюрами токов и напряжений (рисунок 1.7). Устройство работает следующим образом. При скачкообразном изменении тока нулевой последовательности ΔI_0 на выходе дифференцирующего блока ДБ появляются импульсы напряжения U_2 , пропорциональные по амплитуде величине скачкообразного изменения тока нулевой последовательности ΔI_0 – при этом в начале изменения тока ΔI_0 формируется положительный импульс напряжения U_2 , а окончании изменения тока ΔI_0 формируется отрицательный импульс напряжения U_2 .

В случае, если величина скачкообразного изменения тока нулевой последовательности ΔI_0 превышает уставку по току устройства защиты $I_{\text{п}}$ (импульс напряжения U_2 превышает величину порогового напряжения $U_{\text{п}}$ – см. рисунок 1.7, а, б), то пороговый орган ПО запускает формирователи ФОС и ФСП.

Формирователь ФОС вырабатывает импульс напряжения U_3 строго заданной длительностью $\Delta t_{\text{ЗАД}}$. Формирователь ФСП вырабатывает импульс напряжения U_4 , длительность которого Δt_0 равна длительности изменения тока ΔI_0 – при положительном импульсе напряжения U_2 на выходе триггера появляется напряжение U_4 , а по окончании импульса ΔI_0 дифференциальный блок ДБ формирует отрицательный сигнал U_2 , который возвращает триггер формирователя ФСП в исходное состояние – напряжение U_4 становится равным нулю.

При однофазном коротком замыкании длительность Δt_0 импульса напряжения U_4 оказывается больше длительности $\Delta t_{\text{ЗАД}}$ импульса напряжения U_3 (рисунок 1.7, а). Блок сравнения БС сравнивает длительности импульсов и после окончания импульса напряжения U_3 на выходе блока БС появляется напряжение U_5 , которое проходя через блок запрета БЗ, запускает исполнительный орган ИО, который выдаёт сигнал на отключение выключателя повреждённой линии.

При нормальной работе электрической сети при включении или отключении мощных однофазных электроприёмников возникающие изменения тока нулевой последовательности I_0 имеют меньшую длительность, чем при однофазных коротких замыканиях. Соответственно, длительность Δt_0 импульса напряжения U_4 будет меньше длительности $\Delta t_{\text{ЗАД}}$ импульса напряжения U_3 (рисунок 1.7, б), по-

этому напряжение U_5 на выходе блока сравнения БС не появится и сигнал на исполнительный орган ИО не поступит.

В случае, если величина скачкообразного изменения тока нулевой последовательности ΔI_0 не превышает уставку по току устройства защиты I_{Π} (импульс напряжения U_2 не достигает величины порогового напряжения U_{Π} – см. рисунок 1.7, в), то формирователи ФОС и ФСП не запускаются и, соответственно, сигнал на исполнительный орган ИО не поступает.

Скачки токов нулевой последовательности I_0 могут появляться, во-первых, при оперативных переключениях в сети, питающей группы электроприемников, в числе которых имеются однофазные, во-вторых, при отключении группы электроприемников, присоединенных, например, к силовому пункту, в результате действия других защит и т.п. Защита в этих случаях будет работать ложно. Для исключения ложных срабатываний, не связанных с однофазными короткими замыканиями, в устройстве имеется блок запрета БЗ, который блокирует прохождение сигнала с блока сравнения БС в исполнительный орган ИО.

Частотно-импульсная защита. В [1, 40] описывается защита ВЛ напряжением до 1 кВ, в принципе действия которой лежит контроль длительности тестового сигнала (рисунок 1.8).

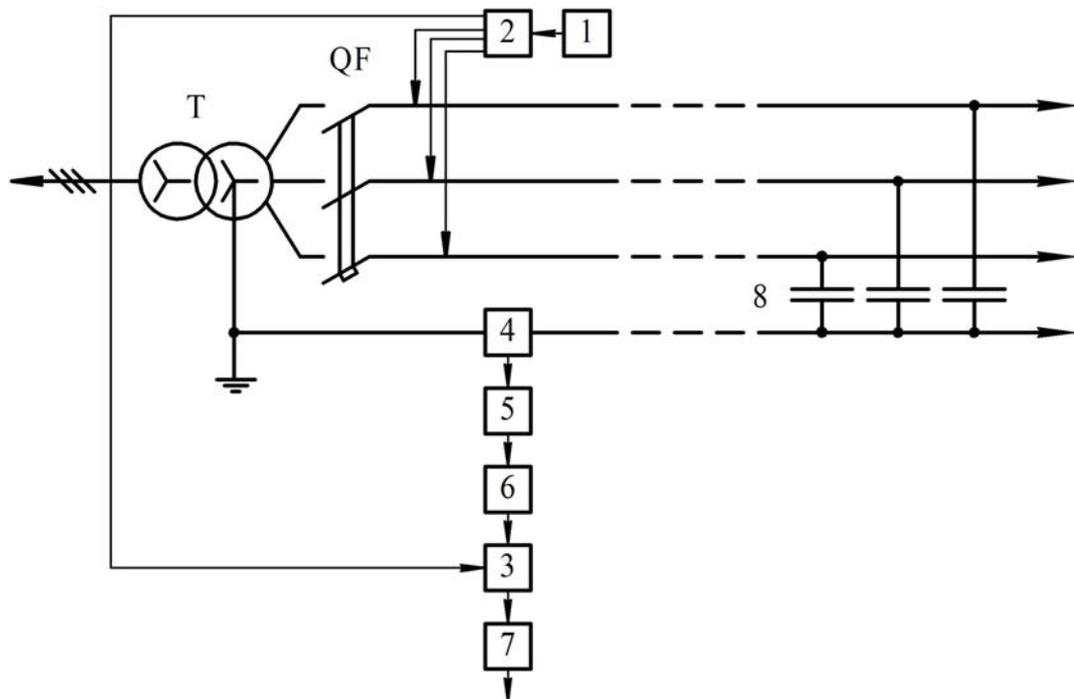


Рисунок 1.8 – Функциональная схема частотно-импульсной защиты

Устройство содержит генератор 1 импульсных сигналов, соединенный с распределителем импульсных сигналов 2, выходы которого подключены к первому входу блока сравнения 3 и фазным проводам линии. Датчик 4 тока, включенный в нулевой провод линии, соединен с усилителем 5 высокой частоты, к выходу которого подключен широтно-импульсный модулятор 6, выход которого соединен с вторым входом схемы 3 сравнения, к выходу которого подключен исполнительный орган 7. Описанные выше блоки защиты размещаются в начале линии. В конце линии устанавливаются три конденсатора 8, каждый из которых одним выводом соединен с одним из фазных проводов линии, а другие выводы соединены вместе и подключены к нулевому проводу.

Устройство работает следующим образом.

Прямоугольный импульс длительностью τ_1 , вырабатываемый генератором 1 импульсных сигналов, подается через распределитель 2 импульсных сигналов поочередно в фазные провода линии, а также на первый вход схемы 3 сравнения. При отсутствии обрыва провода или короткого замыкания импульс, выделенный датчиком 4 тока и усиленный усилителем 5 высокой частоты, имеет нарастающий фронт за счет наличия конденсаторов 8 в конце линии. В данном случае на выходе широтно-импульсного модулятора 6 появляется импульс длительностью τ_2 , который не превышает величины τ_1 . Этот импульс подается на второй вход схемы 3 сравнения.

Так как в данном случае соблюдается условие

$$0 < \tau_2 < \tau_1, \quad (1.8)$$

то сигнал на выходе схемы 3 сравнения отсутствует.

При обрыве провода (фазного или нулевого) на втором входе схемы 3 сравнения импульс отсутствует ($\tau_2 = 0$).

При коротком замыкании на линии электропередачи на втором входе схемы 3 сравнения возникает импульс длительностью $\tau_2 = \tau_1$. Это объясняется тем, что импульс, поступающий на датчик 4 тока, проходит от фазного провода к нулевому проводу через место короткого замыкания, минуя конденсатор 8, который в этом случае оказывается зашунтированным.

В обоих случаях происходит нарушение условия (1.8), что приводит к появлению сигнала на выходе схемы 3 сравнения и срабатыванию исполнительного органа 7 защиты.

К достоинствам защиты следует отнести повышение чувствительности при малых токах КЗ, увеличение быстродействия и возможность обнаружения обрыва фазных или нулевого проводов.

Авторами защиты рассматривался вариант защиты, выполненной на основе контроля амплитуды синусоидального сигнала, которая обладает наилучшими характеристиками по сравнению с рассмотренной защитой. Основной отличительной особенностью схемы с контролем амплитуды сигнала является то, что здесь вместо генератора прямоугольных импульсов используется 1 генератор синусоидальных сигналов, а вместо широтно-импульсного модулятора 6 амплитудный детектор [40]. Срабатывание защиты при ОКЗ и обрыве фазного или нулевого проводов происходило при снижении амплитуды тестового сигнала (в нормальном режиме контур, образованный проводами линии и нагрузочными конденсаторами настроен в режим близкий к резонансу). Однако защита является довольно сложной в конструктивном отношении. К тому же при обрыве нулевого провода тестовый сигнал может пройти через повторное заземление нулевого провода и через основное заземление или через другое повторное заземление нулевого провода попасть на приемник сигналов 4.

Токовая фазосравнивающая защита от однофазных замыканий на землю и обрыва проводов электрических сетей 380 В, выполненных воздушными линиями, защищает сеть от замыканий фазного провода на землю и коротких замыканий фазы на корпус электроустановки. Принцип действия может быть рассмотрен на примере сети с двумя линиями. Схема защиты приведена на рисунке 1.9.

Защита основана на сравнении фаз токов, которые протекают при замыкании на землю в начале линий сети, с фазой тока в заземляющем нейтраль силового трансформатора проводе. Токи измеряются с помощью трансформаторов ТТН, ТТНП1, ТТНП2. Трансформаторы тока нулевой последовательности (дифференциальные трансформаторы тока) ТТНП охватывают все 4 провода линии [38].

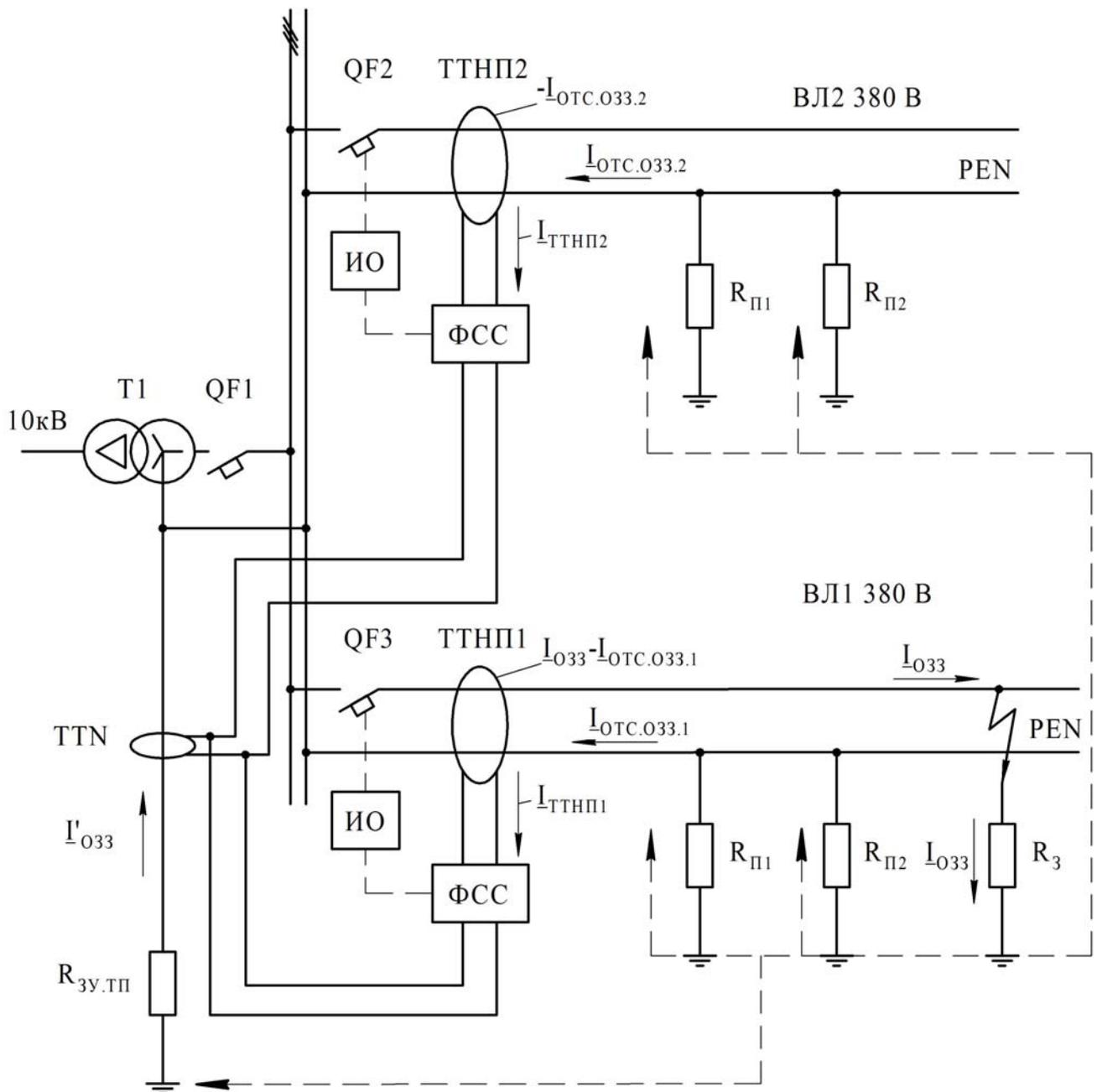


Рисунок 1.9 – Схема токовой фазосравнивающей защиты

При однофазном замыкании на землю ток I_{033} , имеющий направление от шин ТП в линию, проходит по фазе поврежденной линии, месту повреждения и разветвляется по имеющимся путям. Основная часть тока I'_{033} протекает по земле и возвращается в сеть через сопротивление заземляющего устройства ТП $R_{3y.TP}$ в нейтраль силового трансформатора. Часть тока I_{033} через сопротивления повторных заземлителей $R_{П}$ «отсасываются» в нулевые провода поврежденной и непо-

врежденной линий – токи отсоса $I_{\text{отс.033}}$. При этом токи $I_{\text{отс.033}}$, возвращающиеся в сеть через нулевые провода находятся в противофазе с токами I_{033} и I'_{033} .

С помощью трансформатора тока поврежденной линии ТТНП1 измеряется разница между полным током замыкания I_{033} и током отсоса замыкания $I_{\text{отс.033.1}}$

$$I_{\text{ТТНП1}} = I_{\text{033}} - I_{\text{отс.033.1}} \quad (1.27)$$

а трансформатора тока ТТНП2 – только ток отсоса своей неповрежденной линии $I_{\text{отс.033.2}}$

$$I_{\text{ТТНП2}} = - I_{\text{отс.033.2}} \quad (1.28)$$

Поскольку ток I_{033} значительно больше токов отсоса $I_{\text{отс.033}}$, то в поврежденной линии измеряемый ток $I_{\text{ТТНП1}}$ совпадает с направлением тока I'_{033} , протекающим по трансформатору тока ТТН, а в неповрежденной линии измеряемый ток $I_{\text{ТТНП2}}$ находится в противофазе с током I'_{033} .

Сравнивая с помощью фазосравнивающей схем ФСС попарно фазы токов

$$I'_{\text{033}} \text{ и } I_{\text{ТТНП2}}, \quad I'_{\text{033}} \text{ и } I_{\text{ТТНП1}} \quad (1.29)$$

можно определить поврежденную линию и обеспечить селективное действие защиты.

Применение дифференциальных трансформаторов тока ТТНП1 и ТТНП2 на линиях исключает влияние несимметрии нагрузки и обеспечивает повышенную чувствительность.

Порог срабатывания защиты определяется токами небаланса трансформаторов тока ТТНП и ТТН при нормальном несимметричном режиме сети.

Проанализировав существующие средства защиты электрических сетей напряжением 380 В, можно сделать следующие выводы:

1. Токовые защиты ВЛ 380 В, построенные с использованием плавких предохранителей и автоматических выключателей, устанавливаемых в начале ВЛ, имеют ограниченную зону защиты от однофазных коротких замыканий, не превышающую 250–350 м.

2. Для повышения чувствительности защит с использованием плавких предохранителей и автоматических выключателей применяют секционирование ВЛ на участки, в начале которых устанавливаются защитные аппараты. Однако мето-

дика расчёта параметров защитных аппаратов и определения мест их расстановки основывается на расчётах токов однофазного короткого замыкания методом петли «фаза-нуль» и положениях 6-го издания ПУЭ.

3. Действующие ПУЭ 7-го издания требуют, чтобы время отключения повреждения не превышало 5 секунд. В связи с этим возникает необходимость разработки новой методики выбора параметров защитных аппаратов и мест их установки.

4. Защиты, построенные на измерении токов, протекающих по нулевому проводу (токовые реле РЭ-571Т или РЭ13-2) имеют ряд недостатков, таких как:

- при ОКЗ отключается вся линия электропередачи;
- необходимость отстраиваться от токов несимметрии;
- возможны ложные срабатывания при пиковых нагрузках и самоликвидирующихся коротких замыканиях (например, схлестывание проводов, перекрытие межизоляция промежутка птицами и т. д.);
- реле, которые применяются в качестве датчика, включаются в рассечку нулевого провода, повышая вероятность обрыва нуля;
- необходимость учёта снижения токов в нулевом проводе при ОКЗ из-за наличия повторных заземлений нулевого провода.

5. Автоматические выключатели со встроенным расцепителем в нулевом проводе имеют ограниченную область применения – комплектные трансформаторные подстанции мощностью 25, 40 и 63 кВА и имеет практически такие же недостатки, что защиты с токовыми реле РЭ13-2 (РЭ-571Т).

6. Защитам типа ЗТИ-0,4 характерны:

- достаточная высокая по сравнению с обычными автоматическими выключателями чувствительность к междуфазным коротким замыканиям;
- возможность отказов при «посадке» напряжения на шинах 0,4 кВ КТП;
- потеря работоспособности при неполнофазных режимах со стороны 10 кВ;
- сложность электронных схем управления и настройки
- необходимость периодических проверок и ремонтов.

Указанные недостатки защиты типа ЗТИ-0,4 обусловили её ограниченное использование и прекращение производства.

7. Защита, основанная на определении параметров переходных процессов, протекающих при возникновении однофазных коротких замыканий, в частности, на измерении длительности импульсов токов нулевой последовательности, может не срабатывать при неустойчивых повреждениях, когда «фронт» нарастания тока ОКЗ бывает «пологим».

8. Использование для работы частотно-импульсной защиты специальных конденсаторов, подключаемых в конце воздушной линии, снижает в целом надёжность электрической сети. Дополнительно при изменении конфигурации или длины линии, что характерно для рассматриваемых электрических сетей напряжением 380 В, необходимо менять местоположение конденсаторов.

9. Фазосравнивающая защита является довольно сложной в конструктивном исполнении и требует установку в начале каждой воздушной линии дифференциального трансформатора тока или группы из четырёх трансформаторов тока, включенных по схеме дифференциального трансформатора. Кроме того, авторы утверждают, что дифференциальные трансформаторы исключают влияние несимметрии электрических нагрузок потребителя. Это утверждение верно только для электрической сети при отсутствии повторных заземлителей нулевого провода ВЛ и заземляющих устройств потребителей. При их наличии ток несимметрии, во-первых, ответвляется в заземляющие устройства потребителей, во-вторых, стекает с нулевого провода через повторные заземлители в землю. Это уже дополнительный ток небаланса, который также необходимо учитывать.

Из проведенного анализа характеристик существующих защит ВЛ от однофазных коротких замыканий в электрических сетях напряжением 380 В следует, что в силу различных причин ни один из рассмотренных видов защит кроме защит, основанных на применении плавких предохранителей и автоматических выключателей, не нашел широкого применения в действующих электрических сетях.

Защитам же, нашедшим широкое распространение, характерна невысокая

эффективность работы, особенно установленных на линиях, протяженность которых превышает 200–300 м. Поэтому задачи обеспечения надлежащего уровня электробезопасности при ОКЗ до сих пор остаётся нерешённой и актуальной.

1.4 Задачи исследования

Проведенный анализ характеристик известных способов и средств обеспечения защиты ВЛ 380 В от однофазных коротких замыканий показал, что на настоящий момент лучшей совокупностью положительных технико-экономических свойств обладают защиты, основанные на применении плавких предохранителей и автоматических выключателей. Они достаточно надежны, просты в обслуживании и относительно дешевы, не требуют наличия высококвалифицированного персонала, что чрезвычайно важно для сельских электрических сетей. Наряду со сказанным им характерна относительно невысокая эффективность работы, обусловленная различными факторами, особенно защитами, установленным на линиях, протяженность которых превышает 200–300 м. Одним из таких факторов является несоответствие расчётных величин минимального значения тока однофазного короткого замыкания $I_{К.МИН}^{(1)}$ их реальным значениям, а для защит, установленных на протяжённых линиях к таким факторам относится и неправильный выбор места расположения защитных аппаратов по длине ВЛ.

Таким образом, с учётом изложенного выше при устранении указанных недостатков применение защит, основанных на использовании плавких предохранителей и автоматических выключателей, безусловно является целесообразным и экономически оправданным.

Для достижения поставленной цели повышения уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок сельскохозяйственного назначения путем разработки новой методики выбора параметров и мест расстановки плавких предохранителей по длине воздушных линий электропередачи напряжением 380 В, обеспечивающей время срабатывания защиты не более 5 с необходимо решить следующие задач:

1. Выполнить анализ влияния различных факторов на величину тока однофазного короткого замыкания в воздушных четырехпроводных линиях напряжением 380 В и предложить необходимые изменения в методику расчета токов однофазного короткого замыкания.

2. Разработать компьютерную модель электрической сети напряжением 380 В, позволяющую проводить анализ работы этой сети как в нормальном, так и в аварийных режимах.

3. С учетом результатов, полученных на компьютерной модели, сформулировать требования к физической модели и опытной электрической сети, создать эти объекты и провести комплекс исследований режимных параметров на этих объектах.

4. Разработать методику выбора параметров и мест расстановки токовых защит, применение которой на стадии проектирования и при эксплуатации будет обеспечивать время их срабатывания не более 5 с.

5. Оценить повышение уровня электробезопасности в сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями в результате использования разработанной методики выбора параметров и определения мест установки секционирующих плавких предохранителей.

2 РАСЧЁТ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ ДО 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Сложность в определении величины тока однофазного короткого замыкания заключается в том, что на его величину оказывает влияние большое количество различных факторов. К таким факторам отнесём тип, мощность и схему соединения обмоток трансформатора; материал, сечения фазных и нулевого проводов ВЛ; расстояние от трансформаторной подстанции до места короткого замыкания; сопротивление дуги в месте замыкания, увеличение активного сопротивления проводника при нагреве его током короткого замыкания и т.д.

2.1 Анализ методов расчета токов однофазного короткого замыкания в сетях до 1000 В с глухозаземлённой нейтралью

Анализ источников [5, 6, 11, 13–15, 31, 33, 34, 37, 40, 41, 49–56, 64, 65, 75, 100, 112, 113, 122–128, 138–141, 144, 145] показал, что для расчета несимметричных режимов работы электрической сети, в частности, токов однофазного короткого замыкания применяются следующие методы:

- «классический» [57, 65];
- метод симметричных составляющих [57, 64, 65, 122];
- метод фазных координат [68, 80, 88];

«Классический метод» – это метод, в котором в систему уравнений, описывающих состояние соответствующей электрической цепи, входят комплексные токи и напряжения фаз [65]. Поскольку при несимметричных режимах электрических цепей, в частности, при несимметричных коротких замыканиях и обрывах проводников фаз токи фаз, фазные и линейные напряжения, падения напряжения в элементах цепей несимметричны, то при использовании данного метода схема замещения и соответствующие уравнения состояния должны составляться для

всех фаз с учетом взаимоиндукции между ними. Поэтому расчет «классическим» методом оказывается громоздким даже при простой исходной схеме.

Метод симметричных составляющих был разработан американским инженером-электриком Charles LeGeyt Fortescue и опубликован в 1918 г. [145]. Для расчетов коротких замыканий впервые он был применен американскими инженерами С.Ф. Wagner, R.D. Evans и А.Р. Mackerras в 1925–1926 гг. [35, 128]. В настоящее время метод симметричных составляющих положен в основу действующих нормативных документов по расчету токов короткого замыкания.

Метод основан на представлении трехфазной несимметричной системы величин (токов, напряжений, магнитных потоков) в виде суммы трех симметричных составляющих, которые отличаются друг от друга порядком следования фаз и называются системами прямой, обратной и нулевой последовательностей [57]. Метод симметричных составляющих позволяет существенно упростить расчет несимметричных режимов работы трехфазной цепи, если она симметрична, т.е. сопротивления всех фаз этой цепи отдельно для каждой симметричной системы токов одинаковы, а причиной нарушения симметрии является возникновение в одной или двух точках цепи поперечной или продольной несимметрии [65].

Метод фазных координат обладает возможностью простого моделирования пофазного различия параметров как линий электропередачи, так и нагрузок. Его применение позволяет выполнять расчеты установившихся (нормальных) и аварийных режимов в условиях любой несимметрии. Недостатком метода является потребность в увеличении объема информации, требующейся для формирования схем замещения, а также необходимость работы с несимметричной матрицей узловых проводимостей [68, 80, 88].

В данной диссертационной работе предлагается использовать метод симметричных составляющих, как наиболее простой и удобный.

Расчет тока металлического однофазного короткого замыкания согласно [99, 128] для конкретной точки воздушной линии напряжением 380 В производится по формуле:

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CP.HH}}}{\sqrt{(R_{1\Sigma} + R_{2\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (2.1)$$

где $U_{\text{CP.HH}}$ – линейное напряжение электрической сети, которое при расчётах токов КЗ принимается равным номинальному напряжению вторичной обмотки силового трансформатора, 400 В;

$R_{1\Sigma} = R_{2\Sigma}$ и $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma}$ – суммарное активное и индуктивное сопротивления прямой и обратной последовательности цепи короткого замыкания;

$R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ – суммарное активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи короткого замыкания.

Метод петли «фаза-нуль» является производной от метода симметричных составляющих и широко используется при проектировании и эксплуатации электрических сетей напряжением 380 В.

С точки зрения теоретических положений данный метод отличается от метода симметричных составляющих арифметическим сложением модулей полного сопротивления трансформатора и петли «фаза-нуль». Поэтому данный метод может учитывать такие факторы, как эффект «теплого спада» токов короткого замыкания, сопротивление дуги в месте замыкания, сопротивление различного рода контактов и т.д.

Расчёт тока ОКЗ по данному методу производится по формуле:

$$I_K^{(1)} = \frac{U_\Phi}{\frac{Z_T^{(1)}}{3} + Z_\Pi}, \quad (2.2)$$

где U_Φ – фазное напряжение электрической сети 380 В, которое при расчётах токов принимается равным 230 В;

$\frac{Z_T^{(1)}}{3}$ – модуль полного сопротивления силового трансформатора току однофазного короткого замыкания, Ом;

Z_Π – модуль полного сопротивления петли «фаза-нуль», Ом.

Из (2.2) видно, что главное преимущество метода – простота. При этом требуется минимальное количество справочных данных.

Как видно из структуры формулы (2.2) сопротивление короткозамкнутой цепи рассчитывается путем сложения модулей полного сопротивления силового трансформатора и полного сопротивления линии электропередачи. Это приводит к завышению сопротивления короткозамкнутого контура и снижению расчетного тока однофазного короткого замыкания. Так, по данным [14, 52] этот метод может давать погрешность в сторону занижения тока ОКЗ до 60%. Однако такая большая погрешность возможна при близких к источнику коротких замыканиях в мощных электрических сетях. На указанную погрешность значительное влияние оказывает сопротивление дуги в месте замыкания, «тепловой спад» тока КЗ, сопротивление контактов и наличие двигательной нагрузки.

Основными недостатками метода петли «фаза-нуль» является сложение модулей комплексных сопротивлений; не учитывается сопротивление питающей сети напряжением выше 1 кВ; сопротивление нулевой последовательности для воздушной линии электропередачи принимается равным прямой последовательности; не учитывается наличие электрической нагрузки.

По данным [33] и нашим оценкам относительная погрешность метода петли «фаза-нуль», обусловленная сложением модулей комплексных сопротивлений изменяется в пределах от 1% до 12,5 % в электрических сетях с воздушными линиями напряжением 380 В.

Однако при удаленных ОКЗ данный метод даёт удовлетворительные результаты поскольку влияние сопротивления дуги [13] и «теплого спада» будет незначительным [41], влияние величин сопротивления трансформатора по мере удаления точки КЗ от ТП уменьшается и становится незначительным.

В [13] отмечается, что из-за арифметического сложения сопротивлений в данном методе возникает погрешность в сторону увеличения общего сопротивления петли «фаза-нуль», т.е. в сторону запаса.

В [98] приводятся семейство кривых по определению величины тока ОКЗ данным методом.

Для внесения уточнений в действующую методику расчета токов однофазного короткого замыкания в электроустановках переменного тока напряжением

до 1000 В, произведем оценку степени влияния на величину тока ОКЗ различных факторов.

2.2 Анализ факторов, влияющих на величину тока однофазного короткого замыкания

Отметим, что значимость влияния того или иного фактора на величину тока ОКЗ будет определяться исходя из условий, при которых ток ОКЗ принимает минимальное значение. Это обусловлено одним из основных требований, предъявляемых к релейной защите – чувствительности, т.е. способности выявлять и отключать минимальное значение аварийного тока.

Перечислим факторы, влияющие на величину тока ОКЗ:

1. Сопротивление питающей энергосистемы выше 1 кВ.
2. Тип, мощность и схема соединения обмоток силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ.
3. Конструктивные особенности воздушных линий напряжением 380 В: марка и сечение фазных и нулевого проводов; расположение проводов на опоре, наличие повторных заземлителей нулевого провода.
4. Сопротивление дуги в месте замыкания.
5. Увеличение активного сопротивления проводника при нагреве его током короткого замыкания.

Учёт сопротивления питающей сети напряжением выше 1 кВ при расчетах токов ОКЗ в сетях напряжением 380 В зависит от необходимой степени точности расчета, параметров линий электропередачи выше 1кВ и силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ. Сопротивление линии электропередачи выше 1 кВ зависит от её протяженности и сечения проводов [33]. Так в [13] указывается, что сопротивлением энергосистемы (X_C) можно пренебречь при выполнении условия:

$$X_C < 0,1 \cdot X_T \quad (2.3)$$

где X_T – индуктивное сопротивление силового трансформатора.

Учёт сопротивления силовых трансформаторов. Известно, что значительное влияние на величину тока ОКЗ оказывает тип, мощность и схема соединения обмоток силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ.

Активное сопротивление прямой последовательности силового трансформатора главным образом определяется его мощностью и типом (с естественным масляным или воздушным охлаждением).

При определении величины тока ОКЗ согласно методу симметричных составляющих необходимо знать величину сопротивления как прямой, так и нулевой последовательности силовых трансформаторов. Определение величины сопротивления прямой последовательности не вызывает затруднения и рассчитывается по паспортным или справочным данным трансформатора.

В нормативных документах [37, п. 2.1.2; 98] говорится, что величина сопротивления нулевой последовательности трансформаторов должна браться по данным заводов-изготовителей. Это основано на том, что в стандарт [36] внесено требование об измерении сопротивления нулевой последовательности при квалификационных испытаниях трансформаторов мощностью до 6300 кВА. Результаты этих измерений должны вноситься в паспорта всех последующих трансформаторов для информации потребителя. Нормированное значение этого сопротивления и критерии оценки результатов испытания стандартом не установлены, хотя в [58] указывается на то, что ток, при котором проводят измерение должен быть в пределах допустимого тока нейтрали, а также подчеркивается необходимость быстрого проведения измерений для недопущения значительного нагрева металлических частей конструкции трансформатора.

Требования о необходимости измерения сопротивления нулевой последовательности трансформатора на практике чаще всего не выполняется. Эта величина не измеряется и после проведения ремонта трансформаторов специализированными организациями [15].

Исследования, проведенные ещё в конце 60-х годов Пястоловым А.А. [62, 94, 95], Найфельдом М.Р. и Всесоюзным энергетическим институтом (ВЭИ) [75],

показали, что значения сопротивлений нулевой последовательности, приводимые в паспорте трансформатора не соответствуют действительности и не могут быть применены для расчетов токов ОКЗ и, как следствие, выбора уставок токовых защит. В этих работах было показано, что величины сопротивления нулевой последовательности и ее составляющие зависят от магнитного состояния сердечника, от конструктивного исполнения бака силового трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_H . Авторы рекомендовали указанные значения использовать только для приближенных расчетов.

Анализ технических данных трансформаторов, приведённых в справочной и нормативной литературе, показал, что сопротивления нулевой последовательности трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Y_H , приведенные в работе [75] ещё в 1968 г., используются и по настоящее время, без учета возможных их изменений за счёт совершенствования конструкций трансформаторов за последние 50 лет.

Известно, что значение сопротивления нулевой последовательности Z_{0T} в большой степени зависит от конструкции трансформатора (толщина стенок, объема бака, наличия и конструкции охлаждающих труб, ферромагнитных свойств стали сердечника). Ранее расчет его представлял значительные трудности и на практике прибегали к опытному определению значений R_{0T} , X_{0T} и Z_{0T} . Опытами ВЭИ [94, 95] показано, что величина Z_{0T} изменяется в зависимости от насыщения магнитопровода трансформатора, которое, в свою очередь, зависит от подведенного напряжения. С ростом испытательного напряжения возрастает активная составляющая R_{0T} из-за увеличения потерь в стали и уменьшается индуктивная составляющая X_{0T} вследствие насыщения ферромагнитных частей. В целом значение полного сопротивления нулевой последовательности трансформатора падает. Наименьшее значение Z_{0T} соответствует номинальному напряжению.

В работе [15] было показано, что при малых токах I_0 (до $0,25 I_{T,ном}$) значение сопротивления Z_{0T} оказывалось в 1,5–2 раза выше чем в режиме несимметричной нагрузки по фазам. В этой же работе сделан вывод о том, что током, протекающим во вторичных обмотках в опыте по определению сопротивления нуле-

вой последовательности, при разомкнутых первичных, определяется значение индукции в сердечниках и следовательно это сказывается на величинах R_{0T} и X_{0T} . Эта величина асимптотически приближается к значению Z_{0T} для насыщенного сердечника. Однако во избежание чрезмерных местных перегревов и выхода трансформатора из строя в процессе испытаний значение тока обычно ограничивается путём снижения испытательного напряжения.

Расхождение опытных величин полного сопротивления нулевой последовательности для трансформаторов одного типа и мощности по данным [95] составило 30–35 %.

Такой большой разброс объяснялся качеством шихтовки сердечников, разными свойствами электротехнической стали, отличием габаритов, обусловленными допусками на изготовление и проектно-конструкторскими особенностями. Считалось, что основой для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора должен быть опыт и делались попытки изобрести свои схемы и методики нахождения этой величины [62]. Следует отметить, что указанная заводами-изготовителями величина Z_{0T} измерена при малых испытательных напряжениях из-за отсутствия достаточных мощностей в заводских лабораториях [75].

Сопоставление опытных величин сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемой соединений обмоток «звезда-звезда с нулем», измеренных в ВЭИ [75], с ранее полученными на заводах-изготовителях показали, что последние должны быть приняты с понижающим коэффициентом порядка 0,5–0,55 для трансформаторов на напряжение 6–10 кВ и 0,7–0,8 при напряжениях 35 (20) кВ.

С учетом указанных поправочных коэффициентов и данных заводоизготовителей в [75] приведены расчетные значения суммарного сопротивления и его составляющих при вторичном напряжении 400 (230) В для новых трансформаторов, выпускаемых по ГОСТ 11920-66 и ГОСТ-12022-66, а также скорректированные данные по старым трансформаторам, выпускавшимся по ГОСТ 405-41 и ГОСТ 9680-61 (Приложение А, таблицы А1–А3). Суммарное полное сопротивление

ние трансформатора Z_T определяется как сумма сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей, т.е.

$$Z_T = \sqrt{(2R_{1T} + R_{0T})^2 + (2X_{1T} + X_{0T})^2} \quad (2.4)$$

Отношения сопротивлений нулевой последовательности силовых трансформаторов к сопротивлению для различных схем соединения обмоток приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Примерные значения отношения сопротивления нулевой последовательности к прямой силовых трансформаторов 6–10/0,4 кВ (Z_{0T}/Z_{1T}) при различных схемах соединения обмоток

Схема соединения обмоток силового трансформатора 6–10/0,4 кВ		
Δ/Y_H	Y/Y_H	Y/Z_H
≈ 1	7–9	0,24–0,27

Анализируя данные таблицы 2.1 можно сделать вывод, что силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем» имеют наибольшее сопротивление нулевой последовательности и, как следствие, ток ОКЗ за этим трансформаторами будет иметь наименьшее значение.

При использовании паспортных данных о сопротивлении нулевой последовательности трансформаторов 6–10/0,4 со схемой соединения «звезда-звезда с нулем» при расчётах токов ОКЗ необходимо их умножать на поправочный коэффициент 0,5–0,55 [75].

Учёт конструктивных особенностей воздушных линий напряжением 380 В. На сопротивление прямой и нулевой последовательности ВЛ 380 В влияют марка и сечение фазных и нулевого проводов; расположение проводов на опоре, наличие повторных заземлителей нулевого провода.

Согласно [65] расчет параметров для воздушной линии напряжением 380 В ведется по следующим выражениям:

– активное сопротивление прямой последовательности, мОм,

$$R_{1л(\Phi)} = \frac{\rho}{F} \cdot L \cdot 10^{-3}, \quad (2.5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводов с учетом нагрева проводника до максимально допустимой температуры 70°C ; для меди $\rho = 0,021 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, для алюминия $\rho = 0,034 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$;

F – площадь поперечного сечения проводника, мм^2 ;

L – длина воздушной линии, км.

– индуктивное сопротивление прямой последовательности, мОм,

$$X_{1л(\Phi)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu}{4} + \ln\left(\frac{D}{R}\right) \right] \cdot L \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

μ – относительная магнитная проницаемость материала проводника – для алюминия и меди $\mu = 1$;

$D = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазными проводами (рисунок 2.2, а), см;

D_{AB}, D_{BC}, D_{CA} – расстояние между осями фазных проводов, см;

R – радиус провода, см;

Отметим, что провода, расположенные на крюках (рисунок 2.1, а), имеют индуктивное сопротивление на 6–11 % меньше чем при расположении проводов на траверсах (рисунок 2.1,г и д) [120].

Удельное активное сопротивление нулевой последовательности фазного и нулевого провода воздушной линии согласно [51], мОм,

$$R_{0л(\Phi)} = R_{0(H)} = \left(\frac{\rho}{F} + 3 \frac{\omega\mu_0}{8} \right) \cdot L \cdot 10^{-3}. \quad (2.7)$$

Удельное индуктивное сопротивление нулевой последовательности фазного и нулевого провода воздушной линии согласно [85], мОм,

$$X_{0л(\Phi)} = X_{0(H)} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu}{4} + \ln\left(\frac{D_m}{R}\right) \right] \cdot L \cdot 10^{-3}, \quad (2.8)$$

где $D_m = \sqrt[3]{D_{NA}D_{NB}D_{NC}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазными проводами А, В, С и нулевым рабочим N проводом (рисунок 2.1,б), см.

Следует отметить, что в нормативных документах [37, 99] допущена неточность в определении активного сопротивления нулевой последовательности ВЛ 380 В. В расшифровке активного сопротивления нулевой последовательности отсутствует учёт сопротивления нулевого провода ($R_{0ВЛ} = R_{1ВЛ}$), что недопустимо.

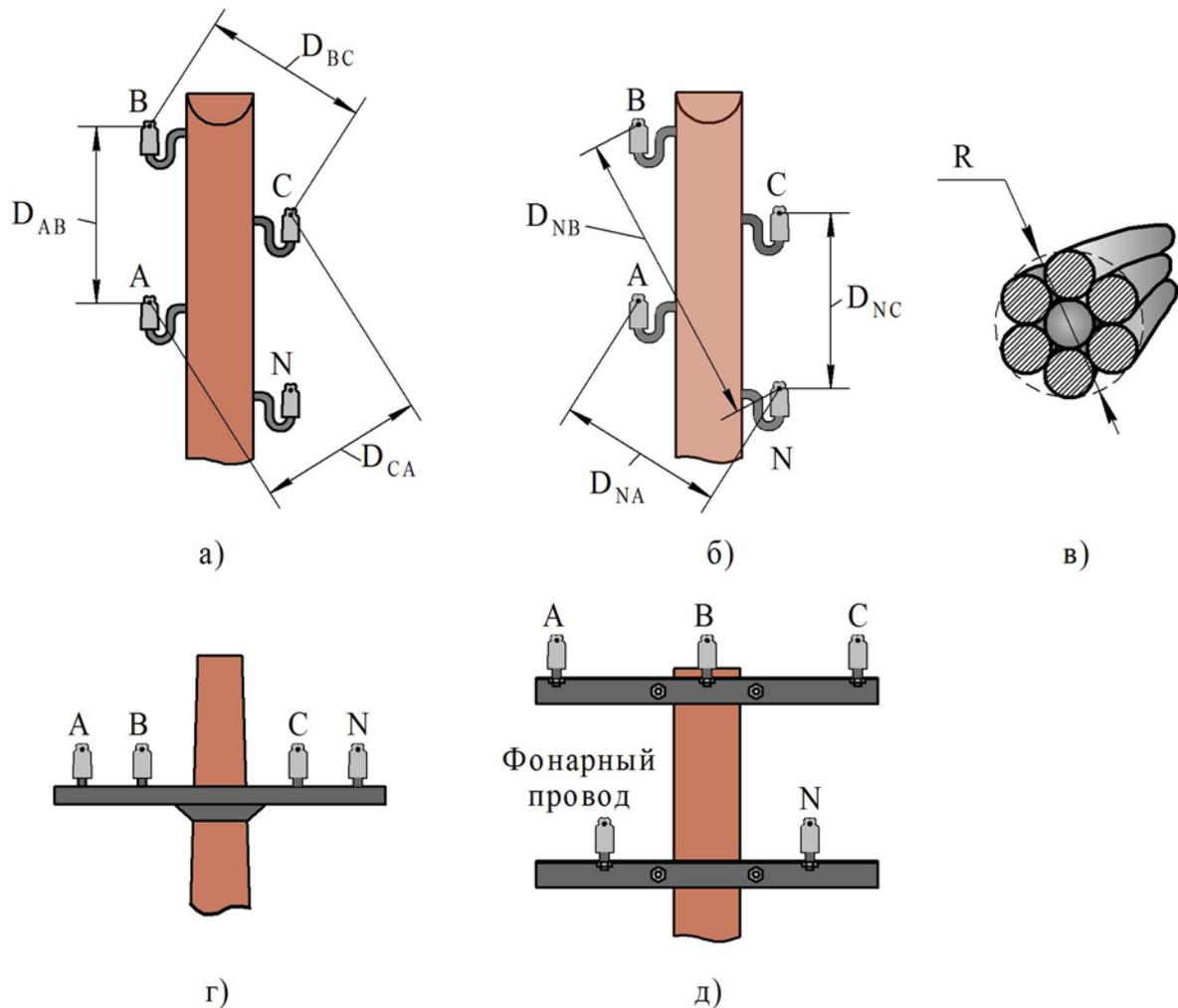


Рисунок 2.1 – Пример расположение проводов на деревянной опоре

- а) расстояния между фазными проводами;
 б) расстояния между фазными и нулевым проводами; в) конструктивное исполнение провода марки АС; г) расположение проводов на одной траверсе; д) расположение проводов на двух траверсах

Сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи при ОКЗ согласно законам электротехники [57, 64] обуславливается сопротивлением нулевой последовательности фазного провода $R_{0Л(Ф)}$ и утроенным значением сопротивления нулевой последовательности нулевого провода $3 \cdot R_{0Л(Н)}$.

Предлагается внести поправки в определение активного (индуктивного) сопротивления нулевой последовательности и рассчитывать их по следующим выражениям:

$$R_{0ВЛ} = R_{0Л(Ф)} + 3 \cdot R_{0Л(Н)}; \quad (2.9)$$

$$X_{0ВЛ} = X_{0Л(Ф)} + 3 \cdot X_{0Л(Н)}, \quad (2.10)$$

где $R_{0Л(Ф)}$ и $X_{0Л(Ф)}$ – активное и индуктивное сопротивления фазного провода воздушной линии электропередачи напряжением 380 В, мОм;

$R_{0Л(Н)}$ и $X_{0Л(Н)}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевого провода воздушной линии электропередачи напряжением 380 В, мОм.

Учёт повторных заземлителей нулевого провода. Влияние повторных заземлителей на ток короткого замыкания предлагается учитывать только в ГОСТ 28249-93. Вопросу учёта повторных заземлителей нулевого провода посвящены работы [5, 6, 31, 120], анализ которых позволил сделать следующие выводы:

– наличие повторных заземлений может привести к увеличению тока ОКЗ от 1% до 35 % в фазном проводе по отношению к расчету тока ОКЗ без учета сопротивления заземляющих устройств. Такое увеличение тока ОКЗ достигается при наличии большого числа повторных заземлителей (7 и более), малых сечениях фазного и нулевого проводов, расстоянии между повторными заземлителями 100 м и сопротивлении каждого из них 10 Ом [5, 31];

– нет единого мнения по учёту сопротивления повторных заземлителей нулевого провода, что указывает на сложность данной проблемы;

– в расчетах, приведенных в [5, 31], принимались минимальные значения сопротивлений повторных заземлителей, равных 10 Ом, а заземляющего устройства ТП – 1 Ом, что, как правило, не соответствует реальным условиям.

В работе [6] показаны графики изменения поправочных коэффициентов, учитывающих уменьшение сопротивления PEN проводника, в зависимости от сечения проводов, количества повторных заземлителей, коэффициента сезонности подобные поправочным коэффициентам, приведенным в ГОСТ 28249-93.

Указанные поправочные коэффициенты учитываются в методе петля «фаза-нуль» следующим образом:

$$I_K^{(1)} = \frac{U_\Phi}{\frac{Z_T^{(1)}}{3} + \sqrt{(K_R \cdot (R_{1\Phi} + R_{1H}))^2 + (K_X \cdot X_\Pi)^2}}, \quad (2.11)$$

где K_R – поправочный коэффициент на уточнение активного сопротивления петли «фаза-нуль»;

K_X – поправочный коэффициент на уточнение индуктивного сопротивления петли «фаза-нуль».

В [31] отмечается, что наличие повторных заземлителей нулевого провода может привести к уменьшению протекаемого по нулевому проводу тока в режиме ОКЗ до 35 %, что важно для настройки защит, реагирующих на ток в нулевом проводе.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод о том, что в практических расчетах сопротивлениями повторных заземлителей можно пренебречь, поскольку расстояние между заземляющими устройствами превышает 100 м, а их сопротивления, как правило, составляют 30 и более Ом, что приводит к заметному снижению влияния их на ток ОКЗ. Кроме того, наличие повторных заземлений приводит к увеличению тока ОКЗ и вероятности срабатывания защит, реагирующих на ток в фазных проводах.

Учёт сопротивления дуги в месте короткого замыкания. Явление электрической дуги было открыто российским учёным В.В. Петровым в 1802 г. [57] и достаточно хорошо изучено. Однако до сих пор нет единого мнения об учёте электрической дуги в расчетах токов короткого замыкания.

Известно, что короткие замыкания через дугу возникают чаще чем металлические. Сопротивление в месте замыкания может значительно снизить величину тока ОКЗ и повлиять на чувствительность защит [13, 138–140]. Поэтому учитывать сопротивление дуги в месте замыкания при определении минимальных значений токов ОКЗ необходимо.

Проблеме учета сопротивления дугового столба при однофазных коротких замыканиях в электрической сети напряжением 380 В посвящено достаточно

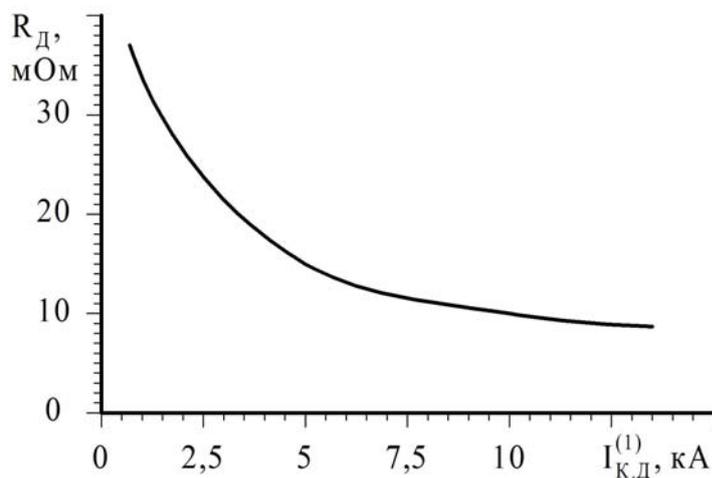
большое количество работ, из которых отметим [13, 50–52, 54, 56, 125, 126, 138–141]. В них показано влияние на сопротивление дуги большого количества факторов, таких как ветровая нагрузка, электродинамические силы, возникающие в дуговом столбе, расстояние между токоведущими частями элементов сети и т.д., часть их которых носит в основном вероятностный характер.

В ГОСТ 28249-93 сопротивление дуги в месте замыкания предлагается определять по двум различным методикам для сетей, питающихся от трансформаторов мощностью от 400 до 2500 кВА. В первой методике сопротивление дуги рассчитывается по эмпирической формуле (2.12), анализируя которую можно увидеть, что сопротивление дуги становится тем больше, чем дальше удалено место ОКЗ (рисунок 2.2, а) [37]

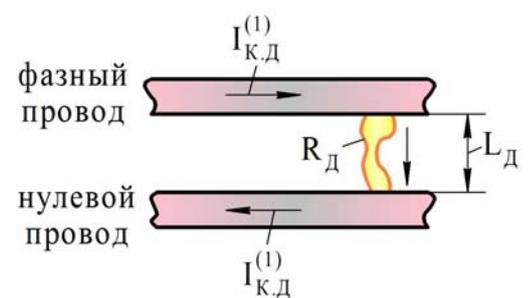
$$R_{\text{д}} = 16 \frac{\sqrt{L_{\text{д}}}}{I_{\text{ПОД}}^{0,85}}, \quad (2.12)$$

где $L_{\text{д}}$ – длина дугового столба, см;

$I_{\text{ПОД}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ, кА, определяемое с учетом сопротивления дуги.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Зависимость сопротивления электрической дуги переменного тока от тока в дуговом столбе ($I_{\text{к.д}}$): а) график функции $R_{\text{д}} = f(I_{\text{к.д}})$;

б) рисунок, демонстрирующий процесс горения дуги

Во второй методике влияние сопротивления дуги на величину тока ОКЗ учитывается путём введения в расчетное выражение по определению тока ОКЗ поправочного коэффициента K_C , зависящего нелинейно от полного сопротивления короткозамкнутой цепи Z_K , т.е. $K_C = f(Z_K)$. Значения поправочного коэффициента K_C для установившегося процесса дугового ОКЗ предлагается определять по формуле:

$$K_C = 0,55 \cdot Z_K^{(1)} - 0,002 \cdot Z_K^{(1)} + 0,1\sqrt{Z_K^{(1)}} - 0,12^3\sqrt{Z_K^{(1)}}, \quad (2.13)$$

где $Z_K^{(1)}$ – сопротивления короткозамкнутой цепи, мОм, для ОКЗ определяется по выражению:

$$Z_K^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}, \quad (2.14)$$

Данная методика заимствована из работ фирмы по наладке и совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей (ОРГРЭС) [71], одним из авторов которой являлся Шиша М.А. [141]. Однако по прошествии времени им была предложена новая формула, более точно описывающая экспериментальную зависимость.

Обе методики учета сопротивления дуги в месте замыкания соответствуют физическим процессам горения дуги. Иначе говоря, обе методики дают сопротивление дугового столба в виде нелинейной зависимости от тока ОКЗ, т.е. при увеличении тока ОКЗ сопротивление дугового столба уменьшается [65]. Это также подтверждаются значениями сопротивления дуги, приведенными в [37]. Отметим, что при уменьшении величины тока ОКЗ (т.е. при удалении точки КЗ от ТП), сопротивление дуги увеличивается, но при этом суммарное сопротивление короткозамкнутой цепи возрастает в основном за счет увеличения сопротивления провода. При удалении точки КЗ на расстоянии 200 м и более сопротивление дуги в месте замыкания становится малым по сравнению с суммарным сопротивлением фазного и нулевого проводов.

В ГОСТ 28249-93 [37] расчет сопротивления дуги предлагается учитывать с помощью поправочного коэффициента K_C , обоснование которого приведено в работе [141]. В этой работе представлено эмпирическое выражение для определения

значения указанного коэффициента K_C в функции полного сопротивления цепи току короткого замыкания $Z_K^{(1)}$. Отметим, что это выражение с достаточной для инженерных расчётов степенью точности аппроксимирует экспериментальную зависимость $K_C = f(Z_K^{(1)})$, построенной на основе статистической обработки большого числа экспериментальных данных, полученных в процессе проведения опытов дуговых замыканий в реальных распределительных устройствах Омской ТЭЦ-4, Красноярской ГРЭС-2, Назаровской ГРЭС и ПС «Камала», в пределах изменения $Z_K^{(1)}$ от 40 до 200 мОм.

Для сельских электрических сетей и посёлков городского типа, как правило, характерны относительно большая протяжённость воздушных линий напряжением 380 В и применение подстанций с трансформаторами относительно небольшой мощности. Поэтому сопротивление электрических сетей токам однофазного короткого замыкания может достигать величины, превышающей 200 мОм.

В методике расчётов токов однофазного короткого замыкания, изложенной в [13], указывается на то, что при коротких замыканиях за трансформаторами мощностью до 250 кВА сопротивление дуги практически не влияет на величину тока однофазного короткого замыкания. Это отмечается и в работе [15]. В то же время, эксперименты, описанные в [141, 138–140], свидетельствуют о том, что даже при указанных мощностях трансформаторов целесообразно учитывать сопротивление дуги на относительно небольших расстояниях точки короткого замыкания от силового трансформатора.

На рисунке 2.3 представлена кривая зависимости поправочного коэффициента K_C от полного сопротивления цепи току однофазного короткого замыкания $Z_K^{(1)}$. Часть этой кривой на интервале от точки «а» до точки «б» в диапазоне изменения сопротивления $Z_K^{(1)}$ от 40 до 200 мОм описывается аналитическим выражением (2.34), предложенным в работе [140]:

$$K_C = 0,9177415 - 0,2103849 \cdot e^{-0,006 \cdot Z_K^{(1)}} - 0,242055 \cdot e^{-0,0312 \cdot Z_K^{(1)}} \quad (2.15)$$

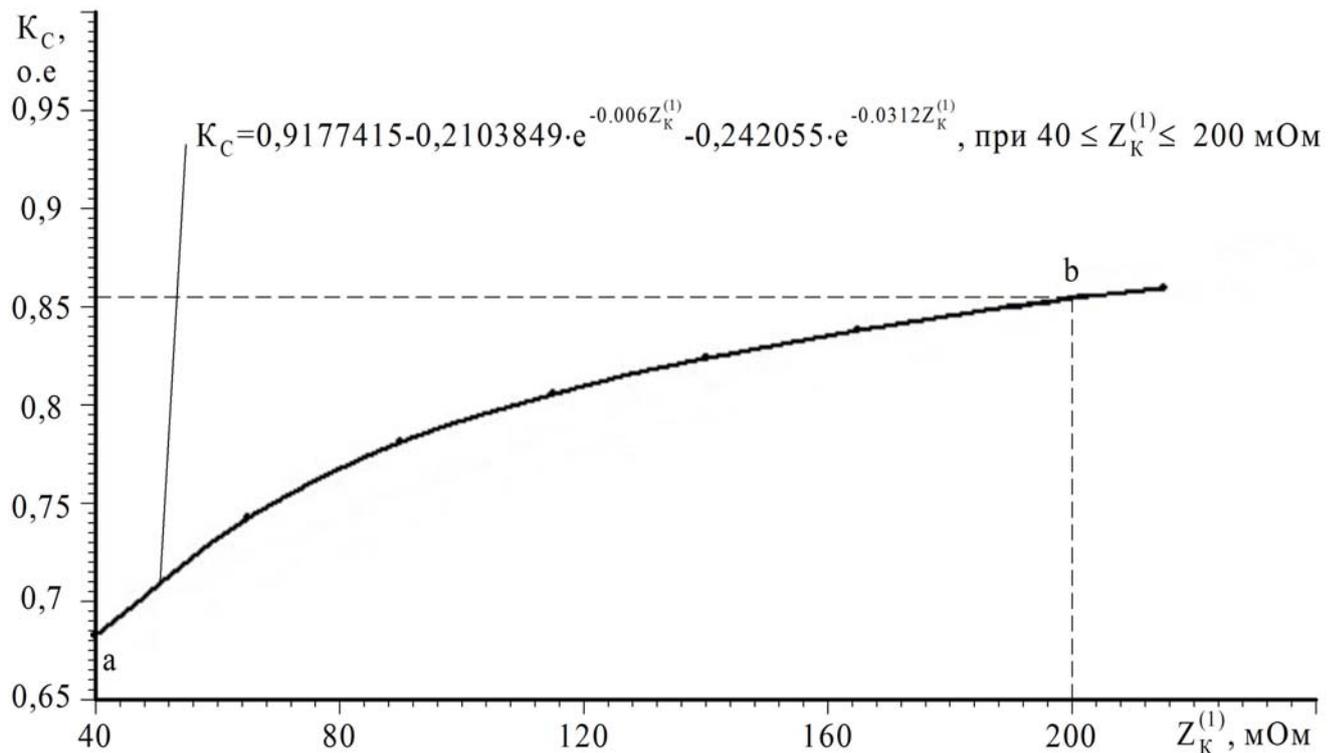


Рисунок 2.3 – Зависимость поправочного коэффициента K_C от сопротивления цепи току однофазного короткого замыкания $Z_K^{(1)}$

Следует отметить, что выражение (2.15) достаточно хорошо описывает зависимость $K_C = f(Z_K^{(1)})$ только в диапазоне изменения сопротивления $Z_K^{(1)}$ от 40 до 200 мОм, причём в точке b значением $K_C = 0,855$. При величине сопротивления $Z_K^{(1)}$ более 200 мОм сопротивление дуги предлагается не учитывать. Это объясняется, во-первых, недостаточной экспериментальной базой, во-вторых, сопротивление дуги при ОКЗ на удалении от ТП 50–150 м будет мало по сравнению с суммарным сопротивлением цепи КЗ без учета дуги, в-третьих, в ГОСТ 28249-93 [37] не приводятся значения сопротивления дуги при КЗ на удалении более 150 м.

Обобщая выше сказанное, в работе предлагается учитывать влияние дуги по методике предложенной в [138], т.е. путем умножения тока металлического ОКЗ на поправочный коэффициент K_C , определенный по формуле (2.15):

$$I_{К,Д}^{(1)} = I_{К,М}^{(1)} \cdot K_C, \quad (2.16)$$

где $I_{К,М}^{(1)}$ – ток металлического ОКЗ, А.

Отметим, что предложенная методика определения коэффициента K_C , не предусматривает учета длины дугового столба, величина которого носит случайный характер [139].

Увеличение активного сопротивления проводника при нагреве его током короткого замыкания. В ГОСТ 28249-93 [37] рекомендуется при расчётах минимальных значений токов короткого замыкания учитывается эффект «теплого спада», т.е. увеличение активного сопротивления проводников в результате протекания по ним токов короткого замыкания. При этом активное сопротивление проводников с учётом нагрева их током КЗ рекомендуется определять по выражению:

$$R_{Л.θ} = K_θ \cdot R_{Л}, \quad (2.17)$$

где $R_{Л}$ – сопротивление линии при начальной температуре 20 °С;

$K_θ$ – поправочный коэффициент, зависящий от величины тока короткого замыкания, материала проводника и его сечения. Причём эти зависимости приводятся только для кабельных линий и времени срабатывания защит равных – 0,2, 0,6, 1,0 и 1,5 с.

Процесс охлаждения проводников воздушных линий, выполненных голыми проводами заметно отличается от процесса охлаждения изолированных проводов и кабелей. Поскольку их изоляция является тепловым барьером. Поэтому применение поправочных коэффициентов $K_θ$, установленных для кабельных линий, при определении сопротивлений воздушных линий к концу протекания по ним тока короткого замыкания очевидно будет давать неверные результаты особенно при относительно больших значениях времени срабатывания защит. Кроме того, как уже отмечалось выше, при определении минимального значения тока ОКЗ следует учитывать влияние сопротивления дугового столба в месте ОКЗ, который будет сказываться и на величину эффекта «теплого спада». В свою очередь, изменение активного сопротивления в цепи короткого замыкания приводит к изменению сопротивления дуги, поскольку оно зависит нелинейно от тока дуги. В приведённом выше ГОСТ 28249-93 не приводится рекомендаций по учёту взаимного влияния указанных факторов.

В связи с выше изложенным в данной работе для выполнения требований ПУЭ 7-го издания [93] в отношении времени срабатывания (5 с) предлагается внести коррективы в расчет минимального значения тока ОКЗ для ВЛ 380 В.

Тепловой спад токов ОКЗ предлагается рассматривать для двух временных диапазонов отключения токов ОКЗ. При близких к трансформаторной подстанции повреждениях (до 50 м) кратности токов ОКЗ по отношению к номинальным токам защитных аппаратов составляют $(8-10) \cdot I_{F.H.}$, а время их отключения не превышает 0,2–0,5 с. С учетом запаса по времени срабатывания защиты, время нагрева проводов на этом участке электрической сети принято 1,5 с. При удалении места повреждения от трансформаторной подстанции на расстояние более 50 м кратности токов ОКЗ уменьшаются, но время отключения защитных аппаратов не должно превышать 5 с. Это время и принято для расчета теплового спада токов ОКЗ на последующих участках ВЛ 380 В. Это дополнение позволит дифференцированно определять эффект «теплового спада» тока ОКЗ на разных участках электрической сети напряжением 380 В. Для определения увеличения активного сопротивления проводника в зависимости от величины тока ОКЗ и времени его протекания по проводнику использована формула, предложенная в [41], для случая процесс нагрева проводника является адиабатическим [135], т.е. без отдачи тепла в окружающую среду.

В [13] приводятся расчётные выражения для определения сопротивлений фазного и нулевого проводов с учётом «теплового спада», как для прямой, так и нулевой последовательностей.

Согласно [13] величина активного сопротивления фазных и нулевого проводов в момент времени t при протекании по ним тока однофазного дугового короткого замыкания определяется по следующим формулам:

Активные сопротивления прямой и нулевой последовательности фазного провода, Ом

$$R_{1л.ф.з} = R_{уд.ф} \cdot L_{\phi} \cdot \left[1 + \frac{56,6 \cdot (I_K^{(1)})^2 \cdot t}{F_{\phi}^2} \right]; \quad (2.18)$$

$$R_{0л.ф.з} = R_{1л.ф.з} + 0,15 \cdot L_{\phi}, \quad (2.19)$$

где $I_K^{(1)}$ – ток однофазного короткого замыкания на нулевой рабочий провод, кА;

$R_{уд.ф}$ – погонное сопротивление фазного провода, Ом/км;

$F_{ф}$ – сечение фазного провода, мм²;

$L_{ф}$ – длина фазного провода, км;

t – время протекания однофазного короткого замыкания, с.

Активное сопротивление нулевого провода:

$$R_{н.9} = R_{л.н.9} + 0,15 \cdot L_{н}, \text{ Ом}, \quad (2.20)$$

где $R_{л.н.9}$ – составляющая сопротивления рабочего нулевого провода, учитывающая нагрев провода токов ОКЗ, Ом;

$L_{н}$ – длина нулевого провода, км.

Составляющая сопротивления $R_{л.н.9}$ нулевого провода, учитывающая нагрев провода токов ОКЗ, определяется по выражению аналогичному (2.18)

$$R_{л.н.9} = R_{уд.н} \cdot L \cdot \left[1 + \frac{56,6 \cdot (I_K^{(1)})^2 \cdot t}{F_{н}^2} \right], \quad (2.21)$$

где $R_{уд.н}$ – погонное сопротивление нулевого провода, Ом/км;

$F_{н}$ – сечение нулевого провода, мм²;

$L_{н}$ – длина нулевого провода, км.

Проведенный анализ влияния теплового спада на величину тока ОКЗ в работе [41] показал его значительное влияние при близких КЗ к питающей ТП. Поэтому тепловым спадом тока ОКЗ можно пренебречь при КЗ на расстоянии от питающей ТП 200 м и более.

Комплексная электрическая нагрузка, как правило, приводит к увеличению тока ОКЗ в месте замыкания [49, 53] и, соответственно, способствует уменьшению времени срабатывания защиты. Для выбора уставок (параметров) токовых защит необходимо учитывать минимальное значение тока ОКЗ. Поэтому, с учётом сказанного, влияние комплексной электрической нагрузки на величину тока ОКЗ рассматриваться не будет.

2.3 Уточнённая методика расчёта токов однофазного короткого замыкания в электрических сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью, выполненных воздушными линиями

Учитывая изложенное в предыдущих параграфах нами предлагается внести изменения в методику расчёта минимального значения тока ОКЗ в электрических сетях напряжением до 1000 В, описание которой приведено в [37], позволяющие уточнить величину тока ОКЗ. Это в конечном итоге позволит повысить эффективность работы защит от ОКЗ и, как следствие, уровень электробезопасности. Предлагаемые изменения обеспечивают учёт взаимного влияния отдельных факторов друг на друга и тем самым решить поставленную задачу.

Расчёт предлагается вести в следующей последовательности:

1. По выражению (2.14) находится сопротивление короткозамкнутой цепи $Z_{К.М}^{(1)}$, соответствующее металлическому замыканию.
2. По формуле (2.1) определяется величина металлического однофазного короткого замыкания $I_{К.М}^{(1)}$.
3. В зависимости от расстояния L между питающим трансформатором и точкой ОКЗ принимается приближённое значение времени срабатывания защиты от ОКЗ $t_{ОКЗ}$, равным 1,5 с при $L < 50$ м и 5 с при $L \geq 50$ м.
4. Выбранное время $t_{ОКЗ}$ делится на ряд мелких интервалов с заданным шагом Δt и определяется их количество $n = t_{ОКЗ} / \Delta t$.
5. Открывается цикл по расчёту дугового короткого замыкания с учётом эффекта «теплового спада».
6. Определяется значение коэффициента K_C , учитывающего влияние сопротивления дугового столба в месте замыкания. При условии $Z_{К.М}^{(1)} \leq 200$ мОм значение K_C рассчитывается по формуле (2.15), а при $Z_{К.М}^{(1)} \geq 200$ мОм принимается $K_C = 1$.
7. По формуле (2.16) находится значение дугового однофазного КЗ $I_{К.Д}^{(1)}$.

8. Определяются активные сопротивления прямой и нулевой последовательности элементов короткозамкнутой цепи с учётом нагрева фазного и нулевого проводов к концу интервала времени Δt током дугового ОКЗ. При этом активное сопротивление прямой последовательности фазного провода рассчитывается по формуле:

$$R_{1л.ф.9} = R_{1л.ф.} \cdot \left[1 + \frac{56,6 \cdot (I_{к.д}^{(1)})^2 \cdot \Delta t}{F_{\Phi}^2} \right], \quad (2.22)$$

где $R_{1л.ф.}$ – сопротивление фазного провода линии на начало интервала времени Δt , мОм;

Сопротивление нулевой последовательности фазного провода к концу интервала времени Δt определяется по выражению (2.19).

Аналогично находится и сопротивление нулевого провода $R_{л.н.9}$, составляющая которого, учитывает его возрастание, обусловленное протеканием тока дугового ОКЗ, рассчитывается по формуле:

$$R_{л.н.9} = R_{н.} \cdot \left[1 + \frac{56,6 \cdot (I_{к.д}^{(1)})^2 \cdot \Delta t}{F_{н.}^2} \right], \quad (2.22)$$

а само активное сопротивление нулевого провода находится по выражению (2.20).

9. Находится полное сопротивление цепи дугового ОКЗ к концу интервала времени Δt :

$$Z_{к.9}^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(2R'_{1\Sigma} + R'_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}, \quad (2.24)$$

где $R'_{1\Sigma}$ и $R'_{0\Sigma}$ – суммарные активные сопротивления прямой и нулевой последовательностей току однофазного КЗ с учётом нагрева проводов ВЛ 380 В.

Активные сопротивления $R'_{1\Sigma}$ и $R'_{0\Sigma}$ рассчитываются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} R'_{1\Sigma} &= R_{1C} + R_{1К.С} + R_{1РАСЦ} + R_{1л.ф.9} + R_{1Т} + R_{1Ш}; \\ R'_{0\Sigma} &= R_{0К.С} + R_{0РАСЦ} + (R_{0л.ф.9} + 3 \cdot R_{л.н.9}) + R_{0Т} + R_{0Ш} \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

10. Определяется новое значение поправочного коэффициента $K_{С.9}$, соответствующее сопротивлению $Z_{к.9}^{(1)}$, согласно рекомендаций пункта 6, т.е. при

$Z_{К.9}^{(1)} \geq 200$ мОм значение $K_{C.9}$ находится по формуле (2.15), а при $Z_{К.9}^{(1)} \geq 200$ мОм значение $K_{C.9} = 1$.

11. Находится значение тока металлического ОКЗ в конце интервала времени Δt с учётом его теплового спада:

$$I_{К.М.9}^{(1)} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{К.9}^{(1)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{CP.HH}}{\sqrt{(2R'_{1\Sigma} + R'_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (2.26)$$

12. Определяется значение тока дугового ОКЗ в конце интервала времени Δt с учётом его теплового спада

$$I_{К.Д.9}^{(1)} = K_{C.9} \cdot I_{К.М.9}^{(1)}. \quad (2.27)$$

13. Номер текущего шага расчётов i сопоставляется с установленным их общим количеством n . Если $i < n$, то составляющие сопротивлений фазном и нулевого проводов, зависящие от текущего значения температуры проводников, к моменту начала следующего интервала времени Δt принимается соответственно равными

$$R_{1.Л.Ф} = R_{1.Л.Ф.9};$$

$$R_{Л.Н} = R_{Л.Н.9}.$$

Полное сопротивление короткозамкнутой цепи металлическому ОКЗ $Z_{К.М}^{(1)} = Z_{К.9}^{(1)}$.

14. Далее повторяются расчёты начиная с пункта в данной методике до тех пор пока не будет определено значение дугового ОКЗ на последнем интервале времени и принято значение $I_{К.МИН}^{(1)} = I_{К.Д.9.n}^{(1)}$.

На рисунках 2.4 и 2.5 представлена блок-схема алгоритма расчётов по определению минимального значения тока однофазного короткого замыкания по методике, изложенной в данном параграфе.

В таблицах приложения П.Б и на рисунках приложения П.В приведены результаты расчетов токов ОКЗ по разработанному алгоритму расчета.

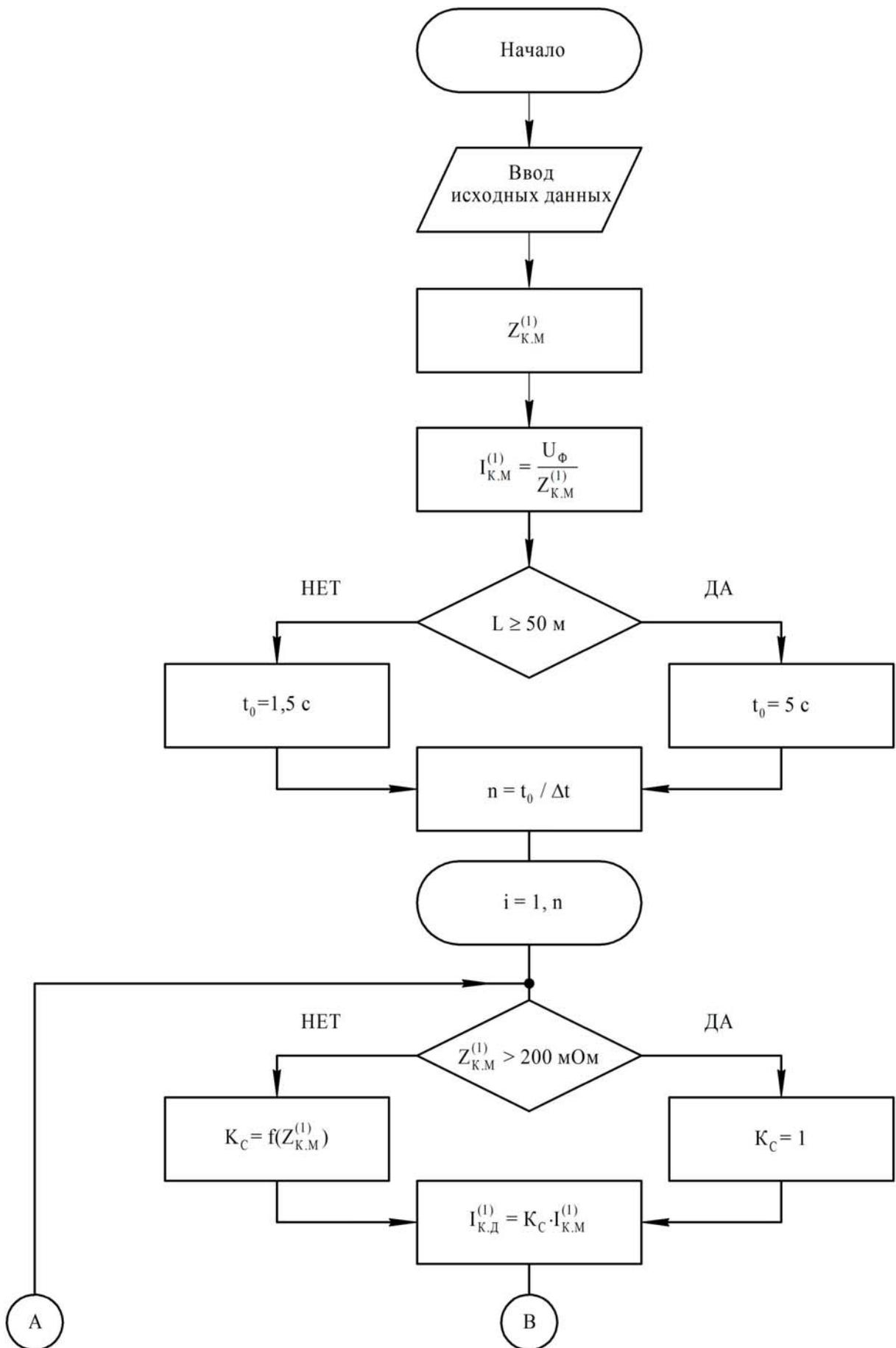


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритма расчета минимального значения тока ОКЗ

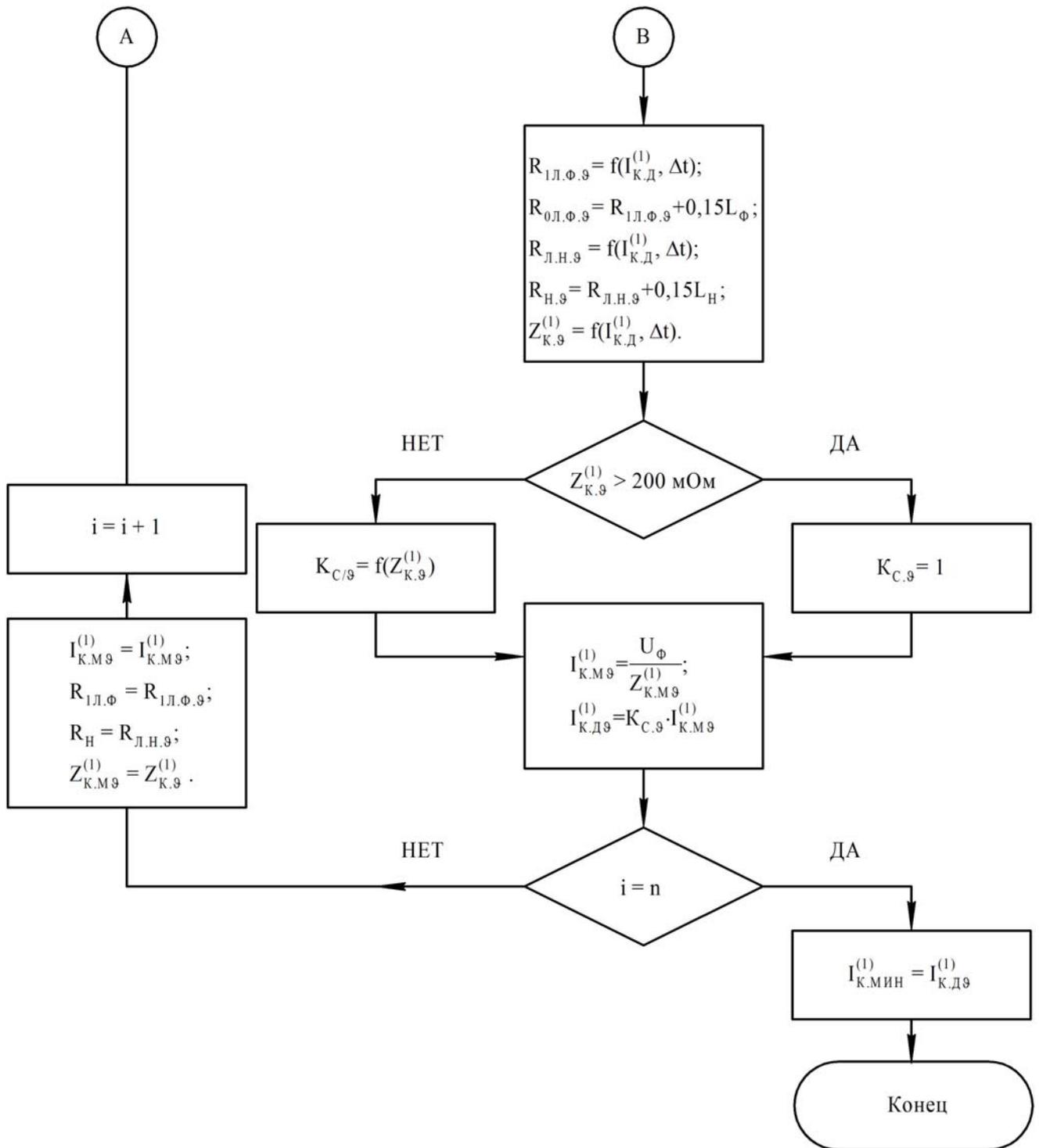


Рисунок 2.5 – Продолжение блок-схемы алгоритма расчета минимального значения тока ОКЗ

2.4 Выводы

1. Проведен анализ существующих методик расчета тока однофазного короткого замыкания в электрических сетях напряжением до 1000 В, изложенных в действующих нормативных документах, который показал что для нахождения тока ОКЗ в сетях 380 В с ВЛ целесообразным является метод симметричных составляющих.

2. В действующих нормативных документах по расчету токов ОКЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ допущены неточности в определении сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора и ВЛ 380 В.

3. Анализ факторов, влияющих на величину тока однофазного короткого замыкания, показал, что:

– сопротивление дуги в месте ОКЗ допускается не учитывать при мощности силового трансформатора менее 250 кВА;

– учитывать эффект «теплового спада» следует при ОКЗ на расстоянии не более 200 м от ТП;

– сопротивлением повторных заземлителей нулевого провода и комплексной электрической нагрузкой при расчете минимального значения тока ОКЗ можно пренебречь.

4. С целью уточнения величины токов однофазного короткого замыкания предложены методика и алгоритм расчета токов однофазного короткого замыкания, учитывающие эффект «теплового спада» и сопротивление дуги в месте замыкания и их взаимное влияние друг на друга.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 380 В С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Для построения токовых защит, обладающих достаточной степенью надежности и селективности работы необходимо владеть информацией о процессах, протекающих в электрических сетях как в нормальных, так и аварийных режимах работы электрической сети. Следует отметить, что для построения токовых защит, основанных на базе плавких предохранителей, необходимо, главным образом, иметь информацию о распределении токов и напряжений в сети в установившихся режимах работы и их предельных значениях. Такое решение объясняется тем, что электромагнитные процессы в сетях 380 В, особенно сельских, протекают очень быстро в силу малости постоянных времени затухания апериодических составляющих токов КЗ, равных приблизительно 0,02–0,03 с [115] и менее. Поэтому в данной работе ограничимся исследованиями изменения установившихся режимных параметров сети в зависимости от влияющих на них факторов в нормальном режиме работы сети и ОКЗ на нулевой рабочий провод и связанные с ним металлические конструкции.

Сведения, приведенные в предыдущих главах, свидетельствуют о том, что исследованию процессов, происходящих в электрических сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями, посвящено достаточно много работ, проведенных в различные периоды времени становления и развития распределительных сетей указанного выше напряжения. Значительная часть этих работ была направлена на установление характерных признаков, присущих аварийным режимам и разработке на их основе средств защиты электрических сетей и повышения уровня их электробезопасности.

Следует отметить, что на величину модулей и фаз напряжений, как фазных, так и линейных, а также токов и их распределение в сети оказывает влияние множество факторов, такие как технические параметры понизительных трансформа-

торов, их внешние характеристики, параметры воздушных линий (ВЛ), величины и места расположения повторных заземлителей нулевого провода, сопротивления заземляющих устройств потребителей и трансформаторных подстанций, степень загрузки фаз ВЛ и их несимметрия, наличие разветвлённых параллельно работающих линий, распределение нагрузок вдоль линии, характер нагрузок и многое другое.

Запись уравнений, описывающих состояние сети с учётом всех указанных выше факторов и их аналитическое решение представляется довольно сложным и трудоёмким процессом. Нетрудно предположить, что даже при успешном решении такой задачи, аналитические выражения для определения напряжений в узлах сети и токов в ветвях получатся громоздкими, включающими в себя большое количество независимых переменных. Использование таких выражений для выявления степени влияния каждого независимого переменного параметра (фактора) на величину и фазу напряжений отдельных фаз сети по отношению к нулевому проводу $\underline{U}_{\phi.N}$, и нулевого провода по отношению к земле $\underline{U}_{N,t}$, а также токов в элементах сети и других режимных параметров, потребует не меньше усилий и объёма вычислительной работы, чем прямое решение системы уравнений, описывающих состояние сети.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать о том, что без применения мощной вычислительной техники и соответствующих программных продуктов провести глубокое и всестороннее исследование режимных параметров (токов, напряжений и мощностей) с учётом целого комплекса влияющих факторов является чрезвычайно сложной научно-технической задачей.

С появлением мощного и универсального программного комплекса «Matlab» с приложением к нему пакета «Simulink» у исследователей появилась возможность проведения исследований режимных параметров сети с учётом практически всех обозримых факторов, оказывающих в той или иной степени влияние на интересующие исследователя параметры.

3.1 Разработка компьютерной модели для исследования несимметричных режимов работы воздушной линии 380 В

С целью проведения достаточно глубоких и всесторонних исследований влияния вышеуказанных факторов на величину токов и напряжений фаз сети, их симметричных составляющих, а также взаимной ориентации указанных величин на комплексной плоскости, была создана серия компьютерных моделей электрической сети напряжением 380 В типа TN – С, выполненных воздушными линиями. Модели созданы в программном комплексе «Matlab» с использованием пакета «Simulink» [23].

Рассмотрим компьютерную модель электрической сети напряжением 380 В типа TN-С в программном комплексе Matlab с использованием пакета Simulink. На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В.

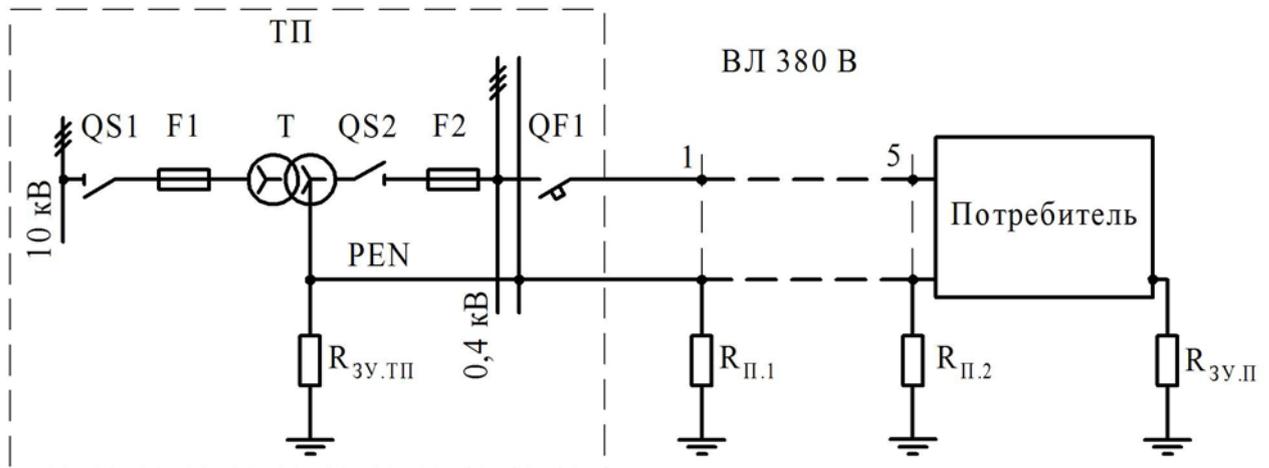


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В:

QS1, QS2 – разъединители; F1, F2 – плавкие предохранители; Т – силовой трансформатор напряжением 10/0,4 кВ; QF1 – автоматический выключатель; $R_{з.у.ТП}$ – сопротивление заземляющего устройства ТП; $R_{П.1}$, $R_{П.2}$ – сопротивления повторных заземлителей нулевого PEN провода; $R_{з.у.П}$ – сопротивление заземляющего устройства потребителя

На рисунке 3.2 представлен общий вид компьютерной модели электрической сети, которая содержит все указанные выше элементы. Отметим, что модели

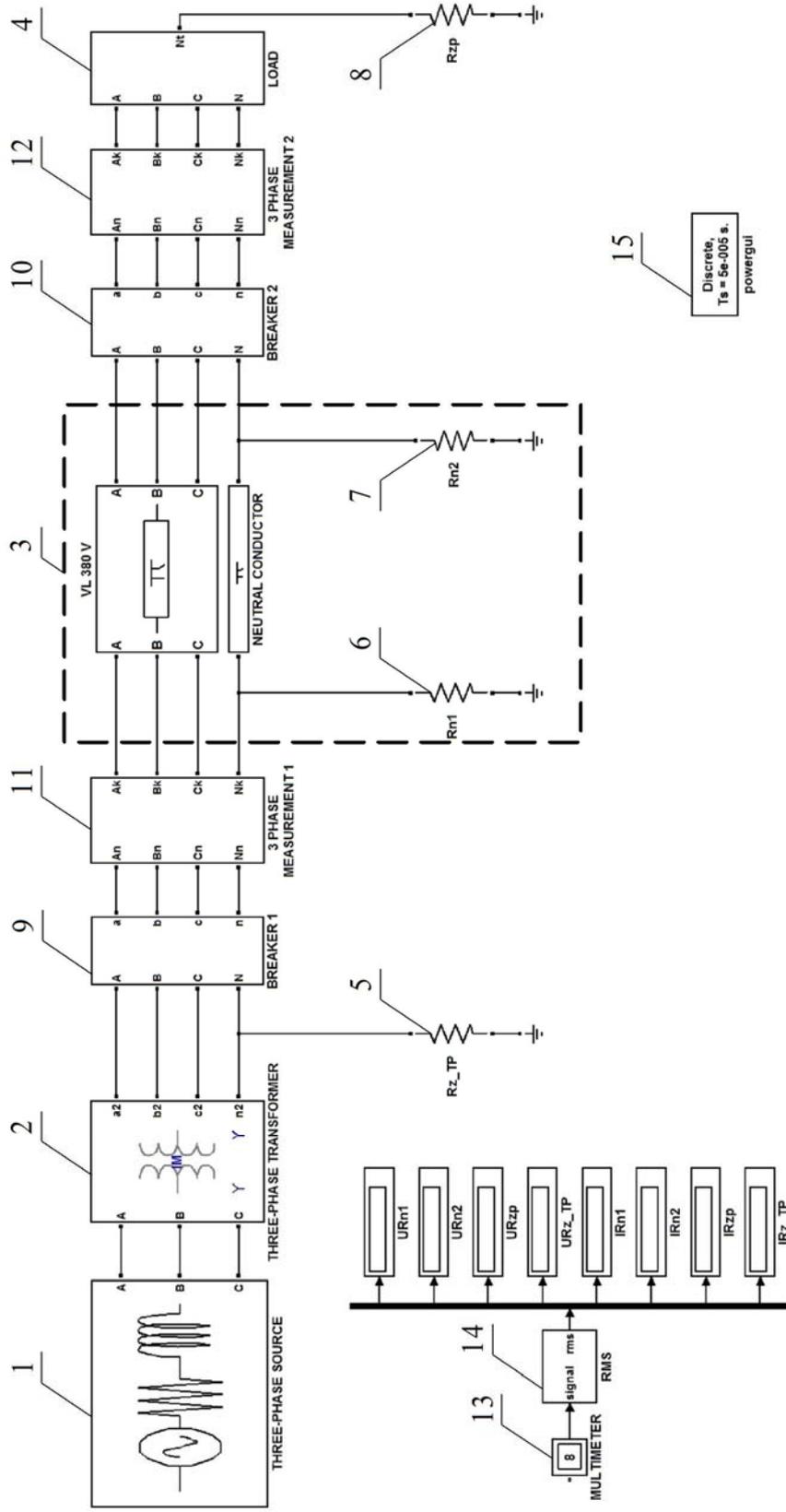


Рисунок 3.2 – Общий вид компьютерной модели электрической сети, выполненной в пакете Simulink: 1 – трехфазный источник электроэнергии напряжением 6–10 кВ; 2 – двухобмоточный трансформатор; 3 – модель четырехпроводной воздушной линии 380 В; 4 – электрическая нагрузка; 5, 6, 7, 8 – сопротивления провода и заземляющего устройства потребителя; 9, 10 – блоки коммутационных аппаратов в начале и в конце воздушной линии; 11, 12 – измерительные комплексы; 13 – блок "Мультиметр"; 14 – блок, рассчитывающий действующее значение синусоидального сигнала; 15 – блок PowerGui

электрической нагрузки, коммутационных аппаратов и измерительных комплексов представлены в виде блоков. Подобные блоки разрабатываются, во-первых, с целью выполнения модели электрической сети более компактной и функциональной, во-вторых, для создания моделей тех электротехнических устройств, которых нет в стандартной библиотеке SimPowerSystems.

На начальном этапе создания модели электрической сети возникают вопросы:

1. С помощью каких блоков моделировать те или иные элементы электрической сети ?
2. Как определять параметры этих элементов ?

Данные вопросы являются важными, поскольку от того насколько правильно мы применим готовые блоки и определим их параметры, будет зависеть адекватность компьютерной модели реальной сети.

Рассмотрим подробнее моделирование основных элементов электрической сети.

Энергосистема моделируется с помощью стандартного блока 1 "Three-Phase Source" библиотеки SimPowerSystem (рисунок 3.2). Этот блок моделирует трёхфазный источник питания со следующими параметрами:

- действующее междуфазное напряжение, В;
- начальная фаза напряжения, принятая нами для фазы А равной 0^0 ;
- частота сети, Гц;
- активное сопротивление источника, Ом;
- индуктивность источника, Гн.

Активное сопротивление и индуктивность энергосистемы в общем случае рассчитывается следующим образом:

1. Полное сопротивление энергосистемы, Ом,

$$Z_{эс} = \frac{U_{ном}^2}{S_{кз}}, \quad (3.1)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение источника, В;

$S_{кз}$ – мощность трёхфазного короткого замыкания на высоковольтных вводах трансформатора, ВА.

2. Внутреннее активное сопротивление энергосистемы, Ом,

$$R_{эс} = \frac{Z_{эс}}{\sqrt{1 + K^2}}, \quad (3.2)$$

где K – отношение индуктивного сопротивления энергосистемы к её активному сопротивлению [65].

Численное значение отношения K определяется по формуле:

$$K = \frac{X_{эс}}{R_{эс}} = -\frac{\pi}{\ln(K_{уд} - 1)}; \quad (3.3)$$

где $X_{эс}$ – внутреннее индуктивное сопротивление энергосистемы, Ом;

$K_{уд}$ – ударный коэффициент.

3. Индуктивность источника, Гн,

$$L_{эс} = \frac{K \cdot R_{эс}}{2\pi \cdot f}, \quad (3.4)$$

где f – частота питающего напряжения, Гц.

(В моделях электротехнических элементов библиотеки SimPowerSystems принято работать с индуктивностью (Гн) и емкостью (Ф), а не с индуктивным и емкостным сопротивлениями соответственно).

С помощью блока 2 "Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)" (рисунок 3.2) моделируется работа трёхфазного двухобмоточного трансформатора с различной конфигурацией обмоток и геометрией магнитопровода. Для этого блока задаются следующие параметры:

- тип магнитопровода: трехстержневой (Three-limb or five-limb core);
- схема соединения первичных и вторичных обмоток: первичной $\Delta 11$ (треугольник, образующий вместе со вторичной обмоткой, соединенной в звезду, одиннадцатую группу) и Y (звезда); вторичной Y_n (звезда с выведенной нейтральной точкой);

- номинальная мощность трансформатора и частота питающей сети, измеряемые соответственно в ВА и Гц (Nominal power and frequency);

- номинальное линейное напряжение первичной и вторичной обмоток (Nominal line-line voltages), В;
- активные сопротивления первичной и вторичной обмоток (Winding resistances), о.е.;
- ток холостого хода (Positive-sequence no-load excitation), %;
- потери активной мощности в опыте холостого хода (Positive-sequence no-load losses), Вт;
- реактивное сопротивление прямой последовательности трансформатора X_T (Positive-sequence short-circuit reactance), о.е.;
- ток намагничивания нулевой последовательности I_0 , определяемый из опыта холостого хода (Zero-sequence no-load excitation current with Delta windings opened), %;
- активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в процессе проведения опыта холостого хода, осуществляемого с целью определения сопротивлений схемы замещения для нулевой последовательности (Zero-sequence no-load losses with Delta windings opened), Вт;
- реактивное сопротивление нулевой последовательности X_0 (Zero-sequence short-circuit reactance), о.е.

Отметим, что все параметры схемы замещения силового трансформатора должны быть приведены к номинальному вторичному напряжению 400 В.

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток в относительных единицах:

$$R_{1*} = R_{2*} = \frac{R_T}{2} = \frac{R_T}{2 \cdot Z_{б.нн}}, \quad (3.5)$$

где R_T – активное сопротивление трансформатора, Ом;

$$Z_{б.нн} = \frac{U_{нн.ном}^2}{S_{т.ном}} \text{ – номинальное сопротивление трансформатора, приведенное}$$

ко вторичной обмотке, Ом;

$$U_{нн.ном} \text{ – номинальное линейное напряжение низковольтной обмотки, В;}$$

$S_{T.НОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА.

Значение R_T определяется по выражению:

$$R_T = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{НН.НОМ}^2}{S_{T.НОМ}^2}, \quad (3.6)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания, Вт.

Реактивное сопротивление трансформатора в относительных единицах определяется:

$$X_{T*} = \frac{X_T}{Z_{б.НН}} = \frac{\sqrt{Z_T^2 - R_T^2}}{Z_{б.НН}}, \quad (3.7)$$

где Z_T – полное сопротивление трансформатора, Ом.

Полное сопротивление трансформатора определяется:

$$Z_T = \frac{U_{кз, \%}}{100\%} \cdot \frac{U_{НН.НОМ}^2}{S_{T.НОМ}}. \quad (3.8)$$

Так как модель трансформатора требует задания параметров для нулевой последовательности, которые производителями трансформаторов, как правило, не приводятся в паспортных данных, то для получения их воспользуемся рекомендациями инструкции к блоку "Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)". При этом учитываем, что в справочниках приводятся активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности, которые используем для определения запрашиваемых моделью трансформатора параметров.

Согласно инструкции к блоку, значения I_0 и P_0 рекомендуется находить путем проведения опыта холостого хода для нулевой последовательности, проводимого при соединении одной из групп обмоток в схему "разомкнутый треугольник". Учитывая вышесказанное, указанные параметры, независимо от схемы соединения обмоток Δ/Y_H или Y/Y_H , могут быть найдены с использованием схемы, представленной на рисунке 3.3 [30, 83], и приводимых в справочниках значений активного и индуктивного сопротивлений нулевой последовательности для трансформаторов со схемой соединения Y/Y_H .

На рисунке 3.3, а приведена схема проведения опыта холостого хода для нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток

Y/Y_H , а её схема замещения – на рисунке 3.3, б. Так как в первичной обмотке, соединенной в звезду, ток нулевой последовательности не протекает, схема замещения (рисунок 3.3, б) преобразуется к виду (рисунок 3.3, в).

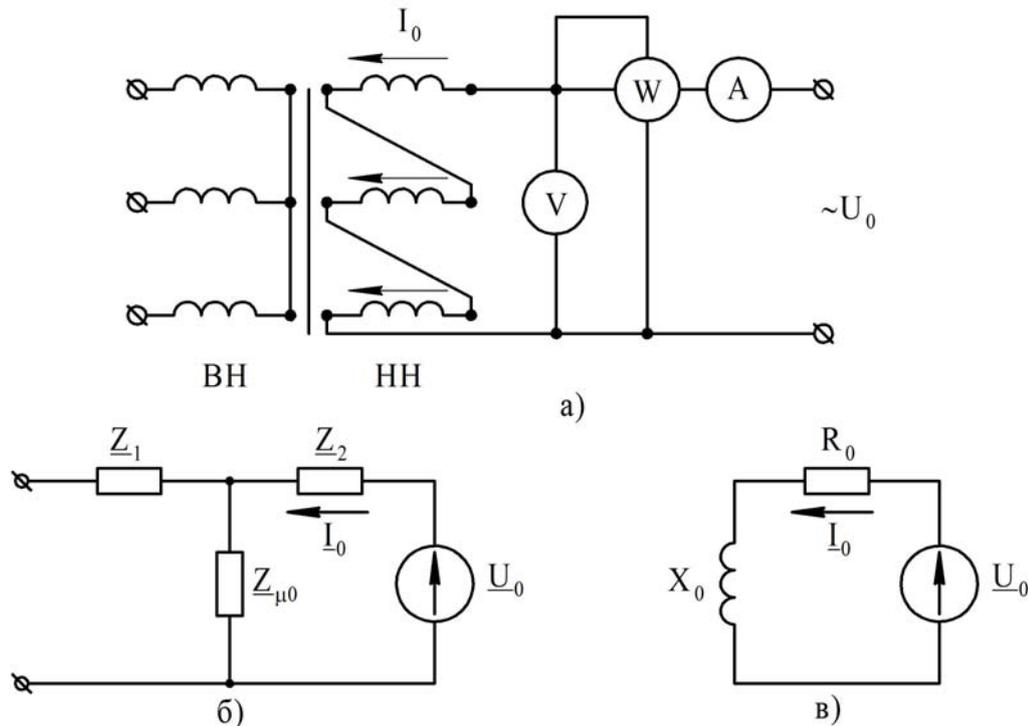


Рисунок 3.3 – Схема опытного определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду

Искомый ток I_0 (А) определяется по выражению:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + X_0^2}} = \frac{U_{\text{нн.ном}(\phi)}}{\sqrt{R_0^2 + X_0^2}}, \quad (3.9)$$

где X_0 – реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, значение которого принимается по справочным данным, Ом;

R_0 – активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, значение которого принимается по справочным данным, Ом;

$U_{\text{нн.ном}(\phi)}$ – номинальное фазное напряжение низковольтной обмотки, В.

Ток намагничивания нулевой последовательности в процентах по отношению к номинальному току трансформатора:

$$I_{0,\%} = \frac{I_0}{I_{\text{нн.ном}}} \cdot 100\%, \quad (3.10)$$

где $I_{\text{нн.ном}}$ – номинальный ток низковольтной обмотки трансформатора, А.

Активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме проведения указанного выше опыта холостого хода для нулевой последовательности, складывается из потерь во вторичных обмотках трансформатора, обусловленных протеканием тока намагничивания тока I_0 , а также потерь в магнитопроводе и конструктивных элементах, обусловленных их перемагничиванием, и вихревыми токами, наведенными магнитными потоками нулевой последовательности.

Численное значение P_0 находится по выражению:

$$P_0 = I_0^2 \cdot R_0, \text{ Вт.} \quad (3.11)$$

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора в относительных единицах определяется:

$$X_{0*} = \frac{X_0}{Z_{б.нн}}. \quad (3.12)$$

Воздушная линия электропередач напряжением 380 В моделируется блоками «Three-Phase PI Section Line» и «PI Section Line» (рисунок 3.4). Блоку «Three-Phase PI Section Line» соответствует трехфазная трехпроводная линия со следующими сосредоточенными параметрами:

- частота сети, 50 Гц;
- удельное активное, индуктивное и емкостное сопротивления прямой и нулевой последовательностей (согласно справочным или расчетным данным) на 1 км длины линии;
- длина линии, км.

Рабочий нулевой проводник моделируется блоком «PI Section Line», который соответствует однофазной линии электропередачи с сосредоточенными параметрами.

При расчетах параметров воздушной линии примем допущение, что проводник представляется в виде одной жилы круглого сечения с радиусом R .

Согласно [64] расчет параметров для воздушной линии напряжением 380 В ведется по следующим выражениям:

– удельное активное сопротивление прямой последовательности, Ом/км,

$$R_{1уд} = \frac{\rho}{F} \cdot 10^3, \quad (3.13)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводов – для меди $\rho = 0,0178$ Ом·мм²/м, для алюминия $\rho = 0,03$ Ом·мм²/м;

F – площадь поперечного сечения проводника, мм²;

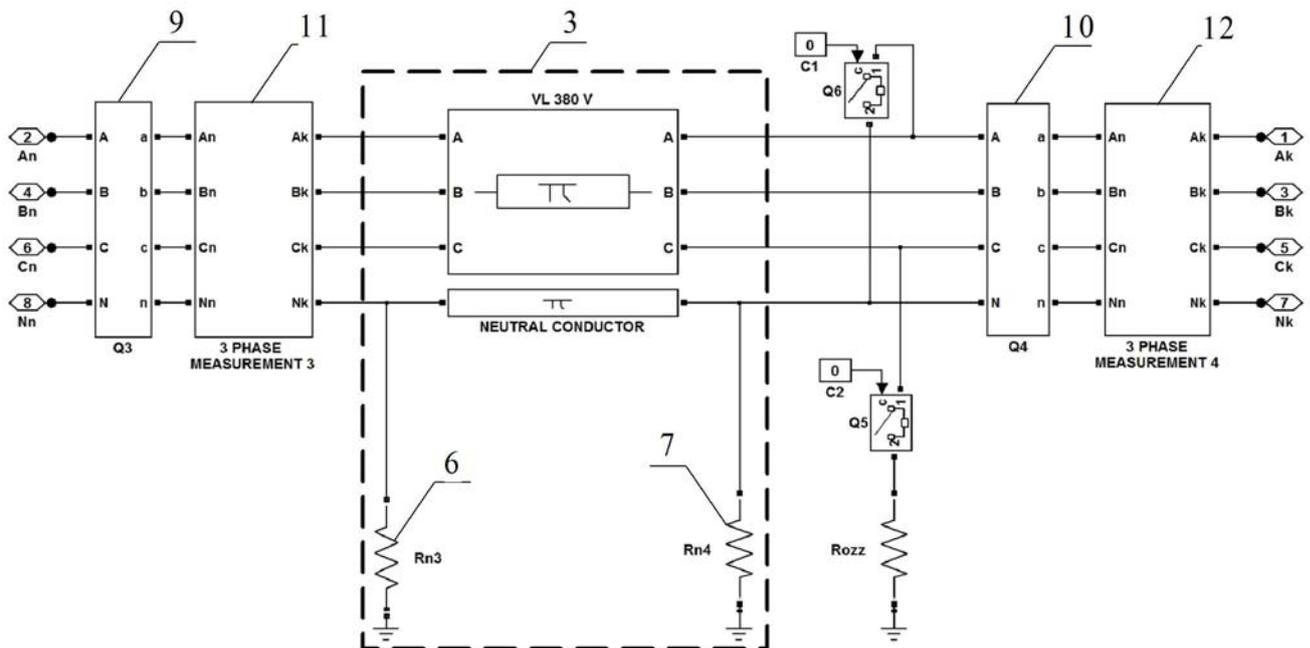


Рисунок 3.4 – Общий вид блока "Четырехпроводная воздушная линия напряжением 380 В"

– удельная индуктивность прямой последовательности, Гн/км,

$$L_{1уд} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu}{4} + \ln\left(\frac{D}{R}\right) \right] \cdot 10^3, \quad (3.14)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

μ – относительная магнитная проницаемость материала проводника – для алюминия и меди $\mu = 1$;

$D = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазными проводами, см;

D_{AB}, D_{BC}, D_{CA} – расстояние между осями фазных проводов, см;

R – радиус провода, см;

В схему замещения нулевой последовательности четырехпроводная воздушная линия входит как сумма сопротивлений нулевой последовательности фаз-

ного провода и утроенного сопротивления нулевой последовательности нулевого провода.

Удельное активное сопротивление нулевой последовательности фазного и нулевого проводов воздушной линии согласно [65], Ом/км,

$$R_{0\text{уд}} = R_{0N\text{уд}} = \left(\frac{\rho}{F} + 3 \frac{\omega \mu_0}{8} \right) \cdot 10^3. \quad (3.15)$$

Удельная индуктивность нулевой последовательности фазного и нулевого проводов воздушной линии согласно [64], Гн/км,

$$L_{0\text{уд}} = L_{0N\text{уд}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu}{4} + \ln \left(\frac{D_m}{R} \right) \right] \cdot 10^3, \quad (3.16)$$

где $D_m = \sqrt[3]{D_{NA} D_{NB} D_{NC}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазными проводами А, В, С и нулевым рабочим N проводом, см.

Следует отметить, что в блоках «Three-Phase PI Section Line» и «PI Section Line» удельная емкость линии рассчитывается согласно [64], мкФ/км,

$$C_{\text{уд}} = \frac{1}{18 \ln \left(\frac{D}{R} \right)}. \quad (3.17)$$

По результатам расчетов удельная емкость воздушной линии напряжением 380 В приблизительно равна $10 - 13 \cdot 10^{-9}$ (Ф/км). В блоке «Three-Phase PI Section Line» задается удельная емкость линии для прямой и нулевой последовательностей, которые принимаются приблизительно равными.

Моделирование реальной электрической нагрузки представляется сложной задачей поскольку:

- электрическая нагрузка является распределенной неравномерно по линии;
- электрическая нагрузка меняется во времени и случайным образом;
- неизвестна схема подключения и мощность электроприемников потребителей, подключенных к исследуемой сети;
- электрическая нагрузка по фазам несимметрична.

Поэтому на данном этапе исследований электрическую нагрузку моделируем (рисунок 3.5) как несимметричную и сосредоточенную в конце воздушных ли-

нии или на ее отпайках, подключаемую как на фазное, так и на линейное напряжения.

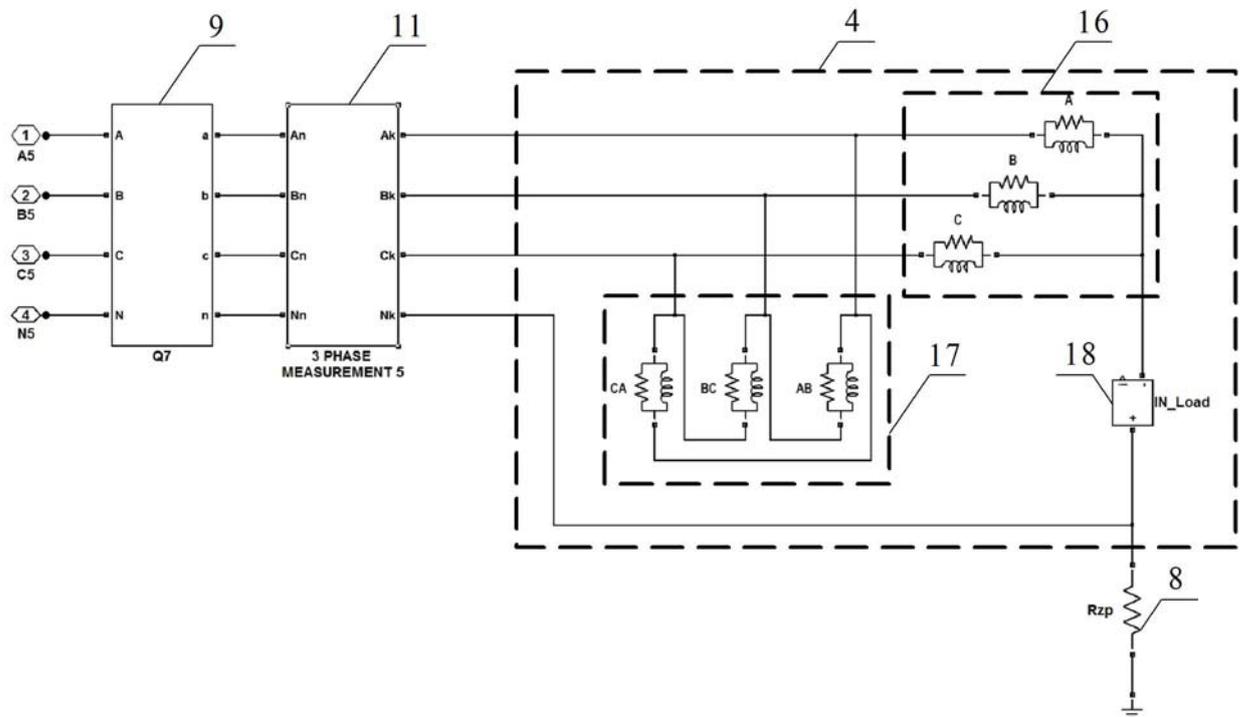


Рисунок 3.5 – Общий вид блока "Электрическая нагрузка":

16 – нагрузка, подключенная на фазное напряжение; 17 – нагрузка, подключенная на линейное напряжение; 18 – блок, измеряющий ток в нейтрали нагрузки

Электрическая нагрузка моделируется путем создания подсистемы "Load", где с помощью стандартных блоков 16 и 17 «Parallel RLC Load» собирается схема электрической нагрузки. Каждый блок «Parallel RLC Load» представляет собой параллельно включенные резистор, индуктивность и емкость. Параметры цепи задаются через мощность цепи при номинальных значениях напряжения и частоты. Основные параметры блока «Parallel RLC Load»:

- номинальное напряжение, В;
- номинальная частота, Гц;
- активная нагрузка, Вт;
- индуктивная нагрузка, вар;
- емкостная нагрузка, вар.

Сопrotивления повторных заземлений рабочего нулевого провода (6 и 7), заземляющих устройств ТП (5) и потребителей (8) моделируются активными сопротивлениями при помощи блоков "Series RLC Branch" (рисунок 3.2 и 3.4). Величины рассматриваемых сопротивлений принимаются равными значениям, измеренным в реальной сети. В случае отсутствия экспериментальных данных они принимаются согласно требованиям ПУЭ.

Моделирование выключателей 9 и 10 (рисунок 3.2) Breaker 1 и Breaker 2 осуществляется стандартными блоками "Breaker", которые устанавливаются в каждую фазу и нулевой провод. Такая расстановка выключателей позволяет моделировать обрывы фазного или нулевого проводов. Основными параметрами этих блоков являются:

- состояние выключателя (1 – включен, 0 – отключен);
- сопротивление выключателя в замкнутом состоянии, Ом;
- сопротивление искрогасящей цепи, Ом;
- емкость искрогасящей цепи, Ф;
- внешнее управление временем срабатывания.

Сопротивление выключателя напряжением 380 В в замкнутом состоянии устанавливается согласно паспортным данным выключателя. Сопротивление искрогасящей цепи принимается равным 10^9 Ом, а емкость искрогасящей цепи – 10^{-12} Ф. Устанавливаем, что выключатель будет управляться внешним источником сигнала. В качестве внешнего источника сигнала используем блок "Constanta". При этом значение 1 соответствует включенному состоянию выключателя, а значение 0 – отключенному.

В компьютерной модели присутствует блок 15 Powergui, который, согласно [133], является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- задание начальных условий;
- создание файла характеристик намагничивания для модели трансформатора с учетом насыщения сердечника;
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи;

- вычисление параметров линии электропередачи;
- расчет установившегося режима;
- дискретизация модели;
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTi-Viewer;
- выполнение гармонического анализа;
- создание отчета.

Для моделирования измерительных приборов используются стандартные измерительные блоки. Если возможностей стандартных блоков не хватает, создается новый измерительный комплекс в виде подсистемы из стандартных блоков. Измерительные комплексы "3 Phase measurement 1" и "3 Phase measurement 2" (рисунок 3.2 и 3.4, блоки 11 и 12), разработанные нами, позволяют измерять:

- линейные напряжения;
- напряжения фаз относительно нулевого провода;
- напряжения фаз и нулевого провода относительно земли;
- напряжения несимметрии трехфазной системы напряжений относительно нулевого провода;
- симметричные составляющие напряжения и тока;
- токи в фазных и нулевом проводах;
- дифференциальные токи;
- фазы полных токов, напряжений и их симметричных составляющих.

Отметим также, что измерение действующих значений токов и напряжений в заземляющем устройстве ТП, повторных заземлителях воздушной линии, в переходном сопротивлении в месте замыкания на землю и в заземляющем устройстве потребителя осуществляется блоком 13 "Multimeter" (рисунок 3.2).

На рисунке 3.2 показана компьютерная модель чисто радиальной воздушной линии напряжением 380 В. Как правило, электрические сети напряжением 380 В, выполненные воздушными линиями, содержат 2–5 ответвлений, которые учитываются при построении компьютерной модели введением дополнительных блоков.

В разработанной компьютерной модели в пакете Simulink программного комплекса Matlab возможно моделирование следующих режимов:

- нормальный режим с различной загрузкой фаз (от холостого хода до максимальной);
- обрывы фазных и нулевого проводов ВЛ;
- обрыв и замыкание фазного провода в конце ВЛ через сопротивление, имитирующее сопротивление в месте замыкания;
- однофазное замыкание на землю;
- однофазное короткое замыкание на нулевой провод.

Обрыв фазного или нулевого проводов моделируется путем отключения одного полюса выключателей Q3 или Q4 (в начале или в конце линии – рисунок 3.4). Однофазное замыкание на землю моделируется путем включения цепи замыкания, состоящей из сопротивления R_{OZZ} , с помощью выключателя Q5 (рисунок 3.4). Однофазное короткое замыкание на нулевой рабочий провод моделируется путем включения выключателя Q6 (рисунок 3.4), соединяющего фазный и нулевой проводники.

Разработанная компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В предоставляет широкие возможности для исследований. Она позволяет моделировать такие режимы электрической сети, которые сложно организовать в реальной сети, и которые небезопасны для людей и животных, находящихся рядом с воздушной линией. Такими режимами могут быть обрыв нулевого провода, однофазное короткое замыкание на нулевой провод в различных точках сети и т.д.

Результаты, полученные на компьютерной модели, зависят от того насколько корректно собрана модель и заданы параметры элементов. Так, например, нами были промоделированы две реальные действующие электрические сети напряжением 380 В, в которых были проведены экспериментальные исследования в нормальном режиме работы при обрывах фазных проводов и однофазном замыкании на землю [22]. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований отличались не более чем на 5–10 %. Это позволяет утверждать, что

компьютерную модель можно использовать для дальнейших исследований электрической сети напряжением 380 В.

Кроме того, глубина и объем исследований на компьютерной модели качественно и количественно превосходят возможные аналогичные исследования в реальной действующей сети. Но это не говорит о том, что можно отказаться от исследований в действующих сетях. Исследования в реальной действующей сети и на компьютерной модели расширяют и взаимно дополняют друг друга.

Таким образом, разработанная компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В, позволяет:

- проводить исследования режимных параметров в различных режимах работы электрической сети напряжением 380 В;
- на основе полученных результатов разработать защиты, основанные на применении плавких предохранителей, автоматических выключателей, дифференциальных выключателей, и защиты, работающие на основе информации о напряжениях электрической сети.

Создана методика определения параметров компьютерной модели для таких элементов электрической сети, как энергосистема, двухобмоточные силовые трансформаторы напряжением 6–10/0,4 кВ, четырехпроводная воздушная линия напряжением 380 В, выключатели и электрическая нагрузка.

3.2 Исследования на компьютерной модели режимных параметров электрической сети напряжением 380 В при однофазном коротком замыкании

Покажем применение разработанной компьютерной модели для исследования некоторых режимных параметров электрической сети напряжением 380 В в режиме однофазного короткого замыкания. При этом воспользуемся данными, полученными нами в реальной воздушной линии, параметры которой были заложены в компьютерную модель.

В таблице 3.1 даны сводные результаты определения токов однофазного ко-

роткого замыкания фазного провода на нулевой, полученные:

- расчётным путем;
- измеренные с помощью прибора ИФН-200;
- непосредственным измерением (там, где оказалось возможным);
- с помощью нашей компьютерной модели.

Таблица 3.1 – Результаты замеров токов однофазного короткого замыкания

Длина участка ВЛ, м	Расчетное значение тока ОКЗ, А	Замер прибором ИФН-200, А	Прямой замер тока ОКЗ, А	Ток ОКЗ, полученный на компьютерной модели, А	$\delta_{\text{ИФН.Р.}}$, %	$\delta_{\text{ИФН.П.}}$, %	$\delta_{\text{П}}$, %	$\delta_{\text{Р}}$, %
0	1037,0	738		1034	28,8			-0,3
25,8	942,9			986,2				4,4
49,1	866,3			924,3				6,3
59,1	833,8			894,9				6,8
91,3	686,0	570		753,6	16,9			9,0
124,9	577,4			638,8				9,6
157	501,0		510	554,3			8,0	9,6
162	492,7			542,9				9,2
188	445,9			490				9,0
228,3	388,4	358,36	396	425,4	7,7	-10,5	6,9	8,7
254,2	358,6			391,9				8,5
280,8	334,0			362,5				7,9
293,4	325,0			350				7,2
318,9	306,1			327				6,4
350,4	287,1	281,8	288	301,8	1,85	-2,2	4,6	4,9
383,8	268,3			278,6				3,7
416,8	252,6			258,9				2,4
449,2	238,9			241,9				1,2
481,1	225,3	228,7	230	227,1	1,5	0,57	-1,3	0,8

Для наглядности полученных результатов замеров токов ОКЗ (таблица 3.1) различными способами представим их в графическом виде (рисунок 3.6).

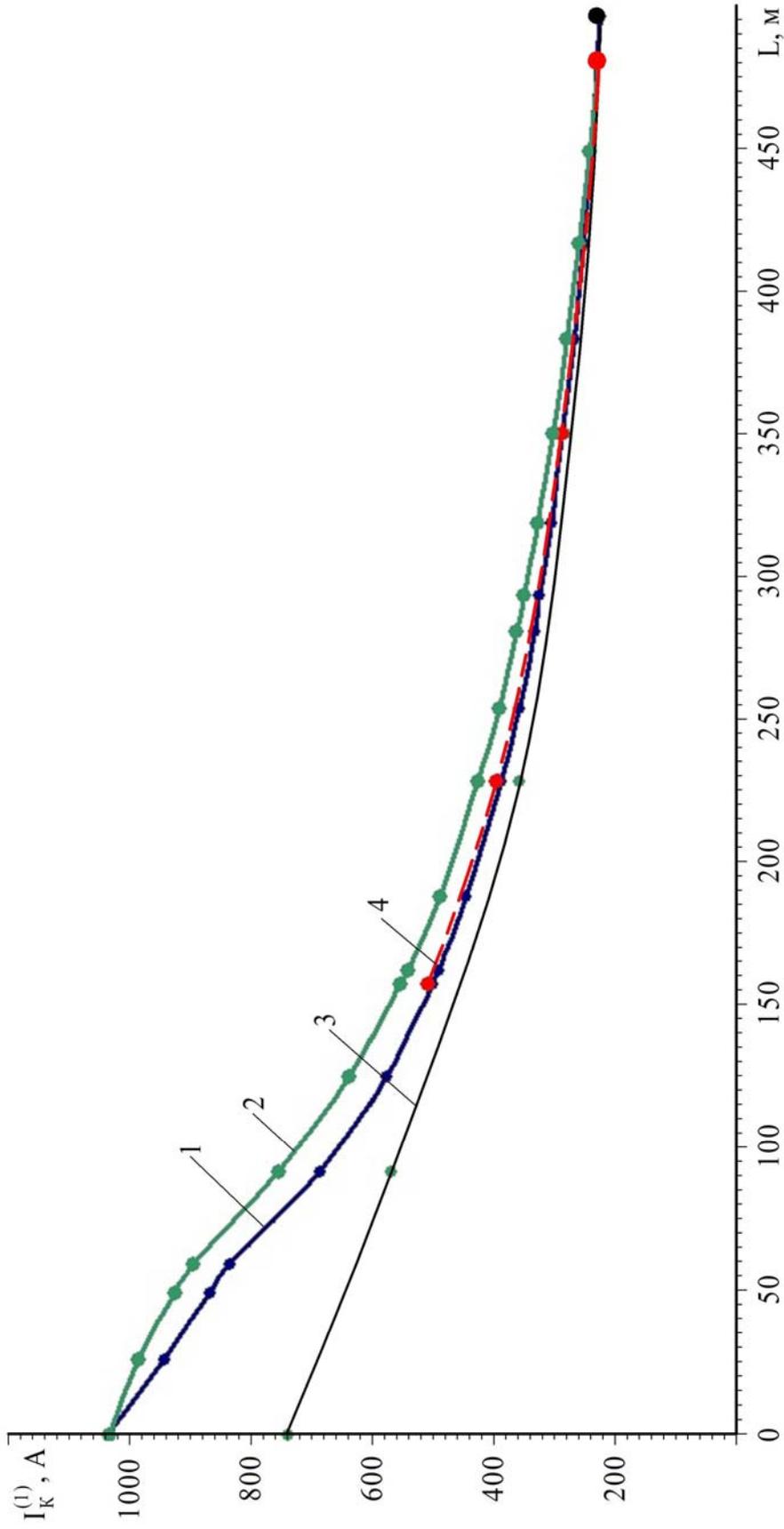


Рисунок 3.6 – Зависимости токов однофазного короткого замыкания от расстояния между ТП и ВЛ:

1 – расчётные данные; 2 – полученные на компьютерной модели; 3 – измеренные прибором ИФН-200;

4 – полученные непосредственным замером при ОКЗ

С целью оценки точности того или иного способов замера токов ОКЗ были определены следующие погрешности:

- относительная погрешностей результатов замеров прибором ИФН-200 по отношению к прямым замерам тока ОКЗ ($\delta_{\text{ИФН.П}}$);
- относительная погрешностей результатов замеров прибором ИФН-200 по отношению к расчетным значениям тока ОКЗ ($\delta_{\text{ИФН.Р}}$);
- относительная погрешностей результатов замеров в компьютерной модели к прямым замерам тока ОКЗ ($\delta_{\text{П}}$);
- относительная погрешностей результатов замеров в компьютерной модели к расчетным значениям тока ОКЗ ($\delta_{\text{Р}}$).

Анализ результатов расчета указанных погрешностей указывает на:

- неудовлетворительную точность замеров близких (на расстоянии, примерно 228 м от ТП) токов металлического ОКЗ прибором ИФН-200;
- достаточную точность замеров приборов ИФН-200 на удаленных точках ОКЗ (более 228 м);
- адекватность компьютерной модели электрической сети, в которой значения токов ОКЗ получились достаточно близкими к расчетным значениям и прямым замерам и находящиеся в пределах инженерной погрешности расчетов $\pm 10\%$

Также на компьютерной модели был проведен эксперимент, связанный с замером фазных напряжений в начале ВЛ 380 В и в месте однофазного металлического короткого замыкания по мере удаления точки короткого замыкания от трансформаторной подстанции (таблица 3.2).

Результаты проведенного эксперимента показывают, что:

- наибольшее изменение фазных напряжений происходит при ОКЗ в РУ-0,4 кВ трансформаторной подстанции. При этом фазное напряжение в поврежденной фазе А принимает минимальное значение, равное 42,12 В, а в неповрежденных фазах В и С напряжение поднимается, практически, до линейного;
- в месте короткого замыкания фазное напряжение при идеальном (без переходного сопротивления) металлическом ОКЗ снижается до нуля, а в неповрежденных фазах, в зависимости от удаленности, становится близким к линейному

напряжению;

Дополнительно был проведен опыт двухфазного короткого замыкания между фазами А и В в конце ВЛ 380 В. В результате проведенных измерений в данном опыте было выявлено, что напряжения в начале ВЛ, практически, не изменились, а в конце ВЛ напряжения в поврежденных фазах стали равными друг другу и по величине вдвое меньше, чем на неповрежденной фазе.

На разработанной компьютерной модели были проведены эксперименты, связанные с определением распределения потенциала по нулевому проводу при ОКЗ в различных точках ВЛ 380 В при наличии и без повторных заземлителей. Результаты экспериментов приведены в таблицах 3.3, 3.4 и на рисунке 3.7.

Анализ результатов измерений, приведенных в таблица 3.3 и 3.4 показывают, что:

– наличие повторных заземлителей нулевого провода уменьшают потенциал нулевого провода при ОКЗ. Так потенциал на нулевом проводе без повторных заземлителей, возникающий при ОКЗ, примерно, в 1,5 раза больше чем с повторными заземлителями;

– наличие повторных заземлителей не всегда обеспечивают безопасный уровень напряжения на зануленных металлических конструкциях. Наибольшее значение потенциала наблюдается при ОКЗ в конце ВЛ 380 В.

Обобщая выше сказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная компьютерная модель является адекватной;
2. Однофазные короткие замыкания на нулевой рабочий провод могут вызывать значительное повышение напряжения в неповрежденных фазах и привести к появлению опасных потенциалов на зануленных металлических конструкциях даже при наличии повторных заземлителей.

3. Полученные результаты не только подтверждают качественный характер распределения потенциалов нулевого провода по отношению к земле, которое, как правило, приводится в научно-технической литературе, но и дают возможность оценить их количественно, а следовательно, оценить и степень их опасности.

Таблица 3.2 – Замеры изменения токов и фазных напряжений при ОКЗ на компьютерной модели действующей электрической сети напряжением 380 В

Номер опоры	Длина, м	Ток ОКЗ, А	Фазное напряжение и его фаза в начале ВЛ						Фазное напряжение и его фаза в месте КЗ					
			U _A , В	φ _A , град	U _B , В	φ _B , град	U _C , В	φ _C , град	U _A , В	φ _A , град	U _B , В	φ _B , град	U _C , В	φ _C , град
1	0	1034	0	0	372,2	-145,5	358,3	148,2	-	-	-	-	-	-
2	25,8	986,2	42,12	-70,57	381,3	-140,4	330	151,7	0	374,5	-143,2	345	149,4	
3	49,1	924,3	75,02	-62,26	381,1	-136,2	303,9	153,4	0	371,9	-141,3	332,7	149,8	
4	59,1	894,9	87,39	-59,04	379,4	-134,5	293,2	153,8	0	370,2	-140,7	327,9	149,7	
5	91,3	753,6	121,1	-45,26	361,6	-130	259,9	151,8	0	359,9	-139,5	317,8	148,4	
6	124,9	638,8	144,7	-36,65	344,5	-126,9	238,4	148,6	0	351,2	-139	311,8	147,1	
7	157	554,3	160,2	-31,06	330,9	-124,9	226,4	145,4	0	344,8	-138,7	308,8	146	
8	162	542,9	162,1	-30,37	329,2	-124,7	225,1	145	0	344	-138,7	308,8	145,9	
9	188	490	171	-27,11	320,2	-123,7	219,5	142,6	0	339,9	-138,7	307,1	145,2	
10	228,3	425,4	181,2	-23,27	308,9	-122,5	214,4	139,4	0	334,9	-138,6	305,9	144,3	
11	254,2	391,9	186,2	-21,34	302,9	-122	212,6	137,7	0	332,2	-138,7	305,4	143,8	
12	280,8	362,5	190,5	-19,69	297,6	-121,6	211,5	136,2	0	330	138,7	305,1	143,3	
13	293,4	350	192,3	-18,94	295,1	-121,4	211,2	135,5	0	328,6	-138,7	305	143,1	
14	318,9	327	239,2	-25,78	326,1	-110,3	144,6	139,6	0	335,2	-131,5	263,9	146	
15	350,4	301,8	199	-16,4	286,8	-120,8	210,2	133,1	0	325,7	-138,7	304,1	142,6	
16	383,8	278,6	202,1	-15,1	282,4	-120,4	209,9	131,8	0	323,7	-130,8	304,5	142,2	
17	416,8	258,9	204,2	-13,99	278,6	-120,4	210,9	130,8	0	322,5	-139	305,4	141,9	
18	449,2	241,9	206,2	-13,04	275,3	-120,3	211,7	130	0	321,4	-139,2	306,1	141,7	
19	481,1	227,1	207,9	-122,9	272,9	-120,21	212,1	129,3	0	320	-139,2	306,3	141,6	
Двухфазное короткое замыкание														
19	481,1	430,4	226,9	-4,795	213,8	-121,6	230,8	119,6	115,5	-60,45	115,5	-60,45	230,7	119,6

Таблица 3.3 – Распределение потенциалов по нулевому проводу φ_N в опытной электрической сети с повторными заземлителями

Номер опоры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Однофазное короткое замыкание на 7-й опоре																		
$\varphi_N, В$	33,76	23,64	14,67	10,96	7,84	26,59	44,7	44,6	44,07	43,26	42,75	42,22	42	41,58	41,29	41,08	40,91	40,78	40,76
	Однофазное короткое замыкание на 10-й опоре																		
$\varphi_N, В$	38,68	31,07	24,28	21,41	7,821	6,905	20,42	22,55	33,61	50,75	50,16	49,54	49,28	48,78	48,45	48,2	48	47,85	47,76
	Однофазное короткое замыкание на 15-й опоре																		
$\varphi_N, В$	39,81	34,55	29,85	27,85	18,4	8,571	1,699	2,824	10,2	22,01	29,662	37,45	41,18	48,76	58,41	58,1	57,86	57,69	57,58
	Однофазное короткое замыкание на 19-й опоре																		
$\varphi_N, В$	32,75	28,83	25,32	23,82	16,76	9,41	2,54	1,619	4,655	13,42	19,1	24,94	27,72	33,38	40,55	48,24	55,89	63,47	70,99

Таблица 3.4 – Распределение потенциалов по нулевому проводу φ_N в опытной электрической сети без повторных заземлителей

Номер опоры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19				
	Однофазное короткое замыкание на 7-й опоре																						
$\varphi_N, В$	0,0055	10,49	19,96	24,03	42,44	61,8														80,4			
	Однофазное короткое замыкание на 10-й опоре																						
$\varphi_N, В$	0,004	7,97	15,17	18,26	32,25	46,96	61,05	63,26	74,69											92,41			
	Однофазное короткое замыкание на 15-й опоре																						
$\varphi_N, В$	0,003	5,585	10,63	12,8	22,6	32,91	42,78	44,33	52,33	64,75	72,73	80,93	84,81	92,7						102,4			
	Однофазное короткое замыкание на 19-й опоре																						
$\varphi_N, В$	0,002	4,21	8,013	9,648	17,04	24,81	32,25	33,42	39,44	48,8	54,83	61,01	63,94	69,9	77,19	84,96	92,63	100,2	107,6				

3.3 Экспериментальные исследования на физической модели электрической сети

Для дальнейших исследований, в соответствии с поставленными задачами, нами была разработана физическая модель электрической сети, подробное описание и параметры которой приведены в [47, 48].

Физическое моделирование – это вид моделирования, который характеризуется, прежде всего, тем, что исследования проводятся на установках, обладающих физическим подобием, т.е. сохраняющих полностью или хотя бы в основном природу явлений. По характеристикам модели можно получить все характеристики оригинала путём пересчетов с использованием коэффициентов подобия (масштабных коэффициентов) [29].

Прототипом нашей физической модели является электрическая сеть напряжением 380 В со следующими параметрами: трансформатор мощность 160 кВА со схемой соединения обмоток Y/Y_H ; четырёхпроводная воздушная линия протяженностью 300 м с проводами марки АС-3х70+1х70 мм² и тремя повторными заземлителями нулевого провода с сопротивлениями $R_{П1}$, $R_{П2}$ и $R_{П3}$ величиной в 30 Ом каждый; трехфазная электрическая нагрузка, сосредоточенная в конце линии, мощностью 60 кВт и $\cos\varphi_H = 1$; конфигурация сети – радиальная. Принципиальная электрическая схема физической модели четырехпроводной электрической сети напряжением 220 В представлена на рисунке 3.8.

С целью обеспечения универсальности физической модели, позволяющей проводить измерения распределения потенциалов вдоль линии, токов в фазах, нулевом проводе и повторных заземлителях, а также имитации различных видов коротких замыканий и замыканий фаз на землю в точках разной удалённости от источника (трансформатора), модель воздушной линии собрана из трёх одинаковых по параметрам секций. Модель позволяет имитировать обрывы фазных и нулевого проводов как в конце каждого участка ВЛ, так и в начале (за трансформатором).

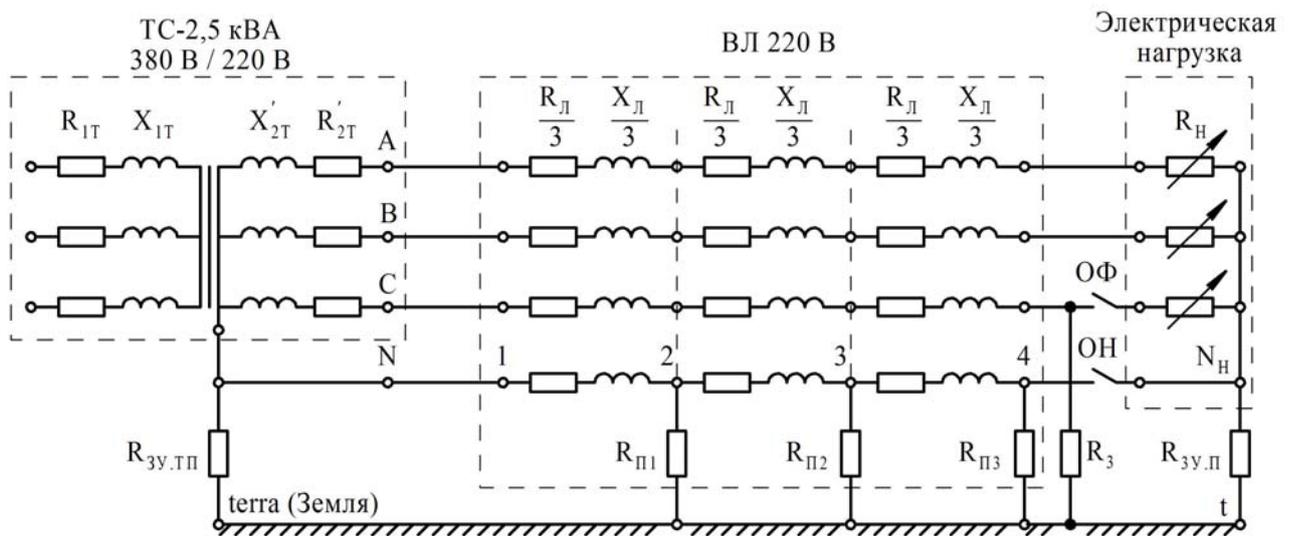


Рисунок 3.8 – Принципиальная электрическая схема физической модели четырехпроводной электрической сети напряжением 220 В

Для оценки сходимости расчётных значений токов ОКЗ, полученных на компьютерной модели и измерений их различными техническими средствами и способами на физической модели были проведены эксперименты по определению токов ОКЗ и напряжений фаз по отношению к нулевому проводу при ОКЗ в конце каждого участка линии и за трансформатором путём прямых замеров с помощью измерительного комплекта Ресурс-UF2М и прибором ИФН-200.

В таблице 3.5 приведены среднеквадратичные значения токов ОКЗ и фазных напряжений в начале линии электропередачи (ВЛ 220 В) и в месте ОКЗ. По данным этих замеров видно, что ОКЗ могут привести к значительному перекосу фазных напряжений и, как следствие, к появлению электроопасной ситуации. Аналогичные результаты были получены на компьютерной модели.

Сопоставительный анализ результатов измерения токов ОКЗ различными способами с результатами расчетов (рисунок 3.9) показал, что величина тока ОКЗ, полученная расчетным путем по методике, приведенной в разделе 2.3, практически совпала с прямым замером и расходится с результатами замера прибором ИФН-200. Причем расхождение тем больше, чем ближе ОКЗ к трансформатору. Это объясняется тем, что при измерении прибором ИФН-200 токов ОКЗ не учитываются физические процессы, протекающие в трансформаторе, в режиме ОКЗ.

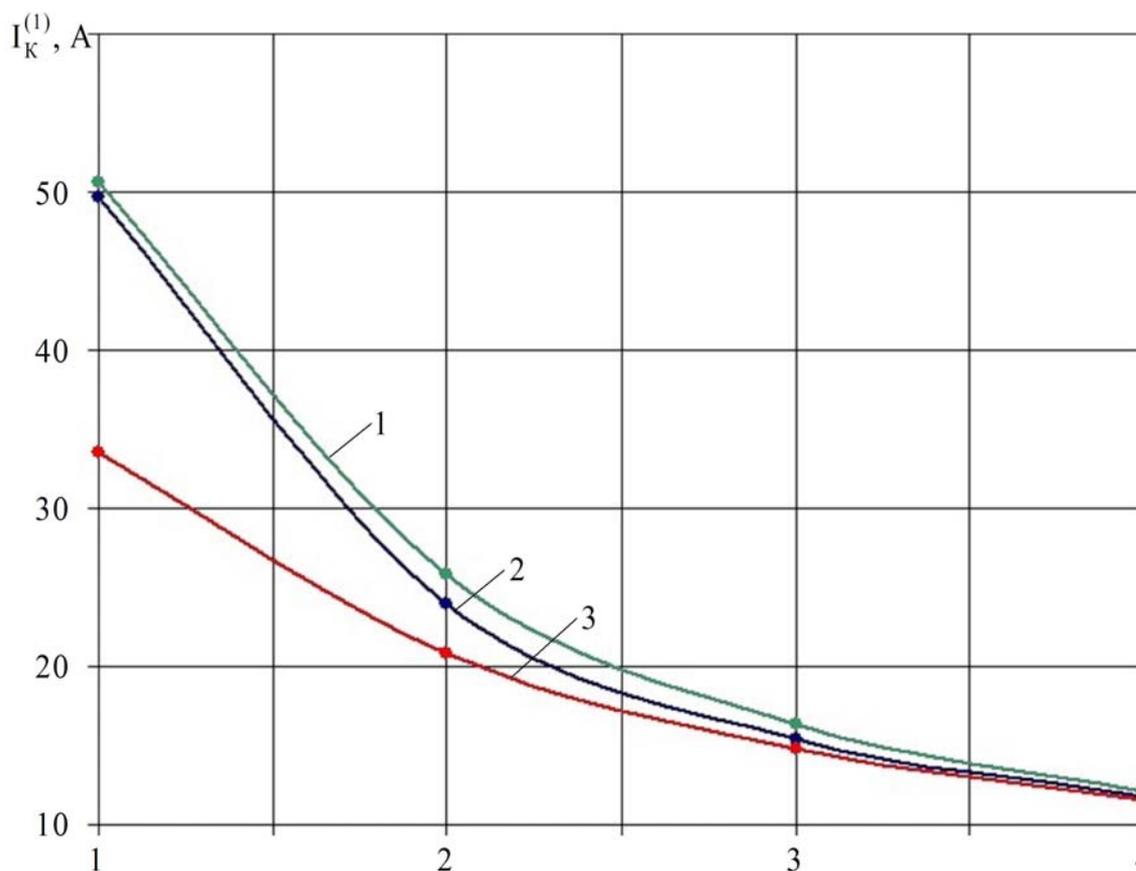


Рисунок 3.9 – Зависимость токов металлических ОКЗ от номера точки КЗ на физической модели: 1 – расчетная кривая (с учетом замеров активного сопротивления катушки и сопротивления петли фаза-нуль ИФН-200); 2 – прямой замер; 3 – ИФН-200

Для проведения расчетов токов ОКЗ нами были проведены замеры сопротивления нулевой последовательности трансформатора согласно ГОСТ 3484.1-88 «Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний». Используя полученные данные, мы получили результаты схожие с замерами прибором ИФН-200, которые не совсем адекватно отражают действительность. Однако, используя рекомендации, приведенные в статье М.Р. Найфельда для трансформаторов 6–10/0,4 кВ [75] мы умножили активное и индуктивное сопротивления на поправочный коэффициент 0,55 и в результате получили величины токов ОКЗ достаточно близких к реально замеренным (рисунок 3.9).

Эксперименты, проведенные на физической модели электрической сети, позволили качественно убедиться в достоверности полученных результатов компьютерного моделирования и влиянии на величину сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора удаленности ОКЗ.

Таблица 3.5 – Натурные замеры токов ОКЗ за трансформатором и ВЛ 220 В физической модели

Замыкание на нулевой провод фазы	Среднеквадратичное значение напряжения за период наблюдения $T_{\text{НАБЛ}}$ в начале линии электропередачи, В			Среднеквадратичное значение напряжения за период наблюдения $T_{\text{НАБЛ}}$ в месте короткого замыкания (в конце линии электропередачи), В			Среднеквадратичное значение тока ОКЗ за период наблюдения $T_{\text{НАБЛ}}$, А	Период наблюдения, с
	U_A	U_B	U_C	U_A	U_B	U_C		
За трансформатором ТС-2,5 кВА								
A	0,239	225,047	185,504				49,651	0,72
B	189,195	0,201	225,301		–		50,195	0,62
C	225,338	188,688	0,193				49,262	0,8
$L_{\text{Л}} = 100 \text{ м}$								
A	78,35	198,919	139,985	0,137	203,229	174,215	23,681	0,36
B	141,134	80,282	196,431	175,887	0,097	203,499	24,508	0,32
C	198,634	140,843	76,441	204,519	174,092	0,093	23,634	0,46
$L_{\text{Л}} = 200 \text{ м}$								
A	95,839	182,474	131,551	0,106	196,928	172,753	15,219	0,6
B	130,349	99,795	179,53	178,482	0,082	201,013	16,016	0,58
C	181,61	132,707	98,025	195,899	173,91	0,059	14,996	0,46
$L_{\text{Л}} = 300 \text{ м}$								
A	105,1	176,218	127,044	0,097	193,519	172,299	11,512	0,74
B	128,191	108,912	171,505	172,044	0,049	190,368	12,158	0,78
C	173,913	132,185	103,622	189,874	172,982	0,041	11,678	0,66

Учитывая результаты исследований, полученных на компьютерной и физических моделях электрической сети напряжением 380 В, а также особенности сельских электрических сетей напряжение 380 В были сформулированы требования к опытной электрической сети, такие как:

- схема соединения обмоток силового трансформатора должна быть «звезда-звезда с нулем»;
- воздушная линия электропередачи должна быть выполнена, в основном, неизолированными проводом сечением не более 70 мм²;
- протяженность воздушной линии электропередачи напряжением 380 В должна быть не более 500 м;
- должны быть повторные заземления нулевого провода воздушной линии;
- обеспечение осуществления практически любых видов измерений.

3.4 Разработка и описание опытной электрической сети

Анализ результатов, полученных в процессе исследований на компьютерной и физической моделях электрической сети, показал, что реализация отдельных аварийных режимов в действующей электрической сети может создать опасные ситуации для электроприёмников, населения и животных [19, 23, 45]:

1. При возникновении однофазного короткого замыкания на воздушной линии напряжение на повреждённой фазе может снижаться до нуля, а напряжения здоровых фаз относительно нулевого провода могут приближаться к линейному значению. Например, в электрической сети с силовым трансформатором ТМГ-160/10/0,4 кВ экспериментальными исследованиями установлено, что при однофазном коротком замыкании в месте повреждения и далее по линии напряжение на повреждённой фазе снижается до 2,5–5 В, а на здоровых фазах возрастает до 310–324 В. Следует добавить, что удалённые однофазные короткие замыкания могут совсем не отключаться защитными аппаратами, либо отключаться в течение единиц и даже десятков секунд – следовательно, имеется большая вероятность повреждения электрооборудования потребителей, и попадания людей и жи-

вотных по напряжению. Кроме того, при ОКЗ существенно возрастает напряжения между нулевым проводом и землей, металлическими корпусами оборудования и землей. Все это приводит к существенному ухудшению электробезопасности.

2. При обрыве нулевого провода напряжения фаз относительно земли зависят от степени несимметрии электрических нагрузок. В предельном случае, например, при практическом отсутствии нагрузок на двух фазах и максимальной нагрузке на третьей фазе напряжение на первых двух фазах может приближаться к линейному значению.

Описанные два случая показывают, что проведение экспериментальных исследований в действующей электрической сети напряжением 380 В опасно для любых электроприёмников, подключенных к этой сети. Из-за возникающих значительных повышений или понижений напряжения более $\pm(5-10)$ % может повреждаться как бытовая (холодильники, стиральные машины, различного рода теле- и радиоаппаратура и др.), так и производственная (насосы, вентиляторы и др.) техника. Кроме того, это может вызвать и возгорание жилых домов.

Для проведения натурных экспериментальных исследований по проекту, разработанному в Южно-Уральском государственном университете (НИУ), филиал ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» построил реальную электрическую сеть напряжением 380 В на своём учебном полигоне, расположенном в селе Миасское, обслуживаемом Красноармейским РЭС ПО «Центральные электрические сети», [72]. Особенностью этой сети является то, что реальные бытовые и производственные электроприёмники заменены нагрузочными сопротивлениями. Такую сеть можно назвать «опытной электрической сетью напряжением 380 В». В дальнейшем этот термин мы будем использовать как при описании электрической сети напряжением 380 В, так и при представлении результатов широкого круга экспериментальных исследований.

При выборе параметров опытной электрической сети, с одной стороны, были проанализированы мощности трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, сечения и протяженности воздушных линий напряжением 380 В, наиболее часто встречающиеся в сельской местности и в посёлках городского типа, а, с другой

стороны, была поставлена задача, чтобы процессы, протекающие в электрической сети при моделировании различных режимов их работы, были максимально приближены к реальным. Были приняты следующие параметры основного оборудования: мощность силового трансформатора 160 кВА, длина воздушной линии напряжением 380 В около 500 м, провод марки АС-4х35 мм².

На рисунке 3.10 показана схема питания опытной электрической сети напряжением 380 В, построенной на учебном полигоне «Челябэнерго». Питание ВЛ 380 В осуществляется от трансформаторной подстанции (ТП) «Лесная», расположенной на территории учебного полигона. На этой ТП установлен силовой трансформатор ТМГ мощностью 160 кВА Минского трансформаторного завода. На концевой опоре ВЛ 10 кВ установлен разъединитель QS1 типа РЛНД-10. В распределительном устройстве 10 кВ ТП установлены разрядники FV типа РВО-10, предохранители F1 типа ПКТ-10 с номинальным током плавкой вставки 10 А. Питание ТП «Лесная» осуществляется по воздушной линии напряжением 10 кВ от подстанции (ПС) «Миасская» напряжением 110/10 кВ, на которой установлены силовые трансформаторы типа ТМН мощностью 6300 кВА. Указанная выше воздушная линия 10 кВ выполнена проводом АС-3х50 мм², общая протяженность её от ПС «Миасская» до ТП «Лесная» составляет 330 м.

На стороне низшего напряжения ТП «Лесная» установлено распределительное устройство РУ-0,4 кВ, от которого непосредственно питается воздушная линия напряжением 380 В. От этой линии предусмотрено питание электрической нагрузки, которая на рисунке 3.10 обозначены Н.

Часть опор (4, 5, 6, 9, 10) – деревянные с железобетонными пасынками, а остальные – железобетонные.

План опытной электрической сети представлен на рисунке 3.11. Фотографии опытной электрической сети показаны на рисунке 3.12: а – КТП «Лесная» с начальным участком ВЛ; б, в – середина и конец ВЛ; г – панель распределительного устройства 0,4 кВ КТП.

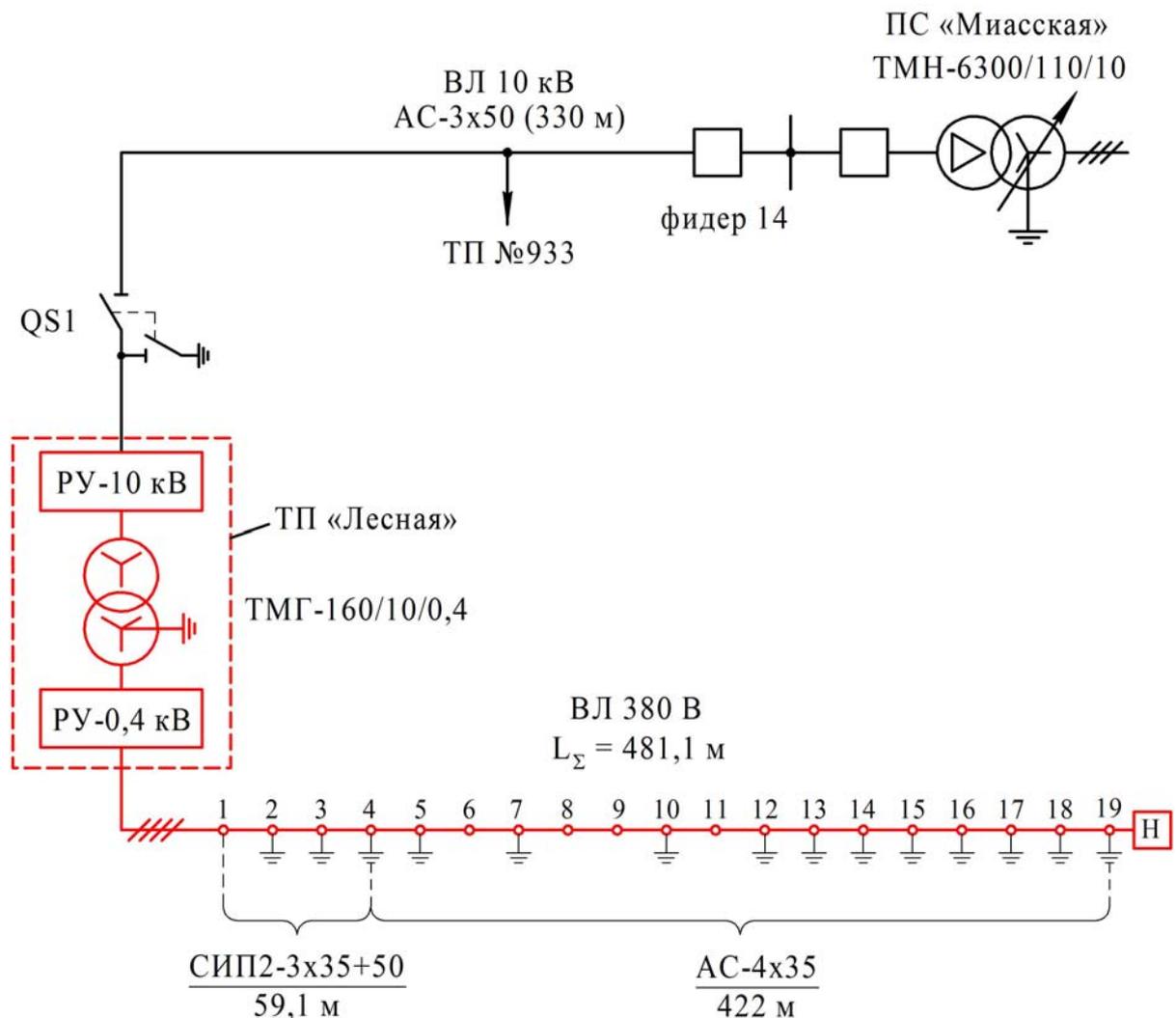


Рисунок 3.10 – Схема питания опытной электрической сети напряжением 380 В

Схема трансформаторной подстанции «Лесная» с распределительным устройством РУ-0,4 кВ показана на рисунке 3.13, спецификация на установленное оборудование приведена в таблице 3.6.

Схема распределительного устройства РУ-0,4 кВ (рисунок 3.12, г) позволяет производить:

– исследования защитных характеристик как автоматических выключателей, так и плавких предохранителей, устанавливаемых в начале ВЛ 380 В. Предусмотрены два варианта питания – через рубильники QS2 и предохранители F2 либо рубильники QS3 и автоматический выключатель QF2. Автоматический выключатель QF1 выполняет функции вводного выключателя и предназначен для общей защиты РУ-0,4 кВ;

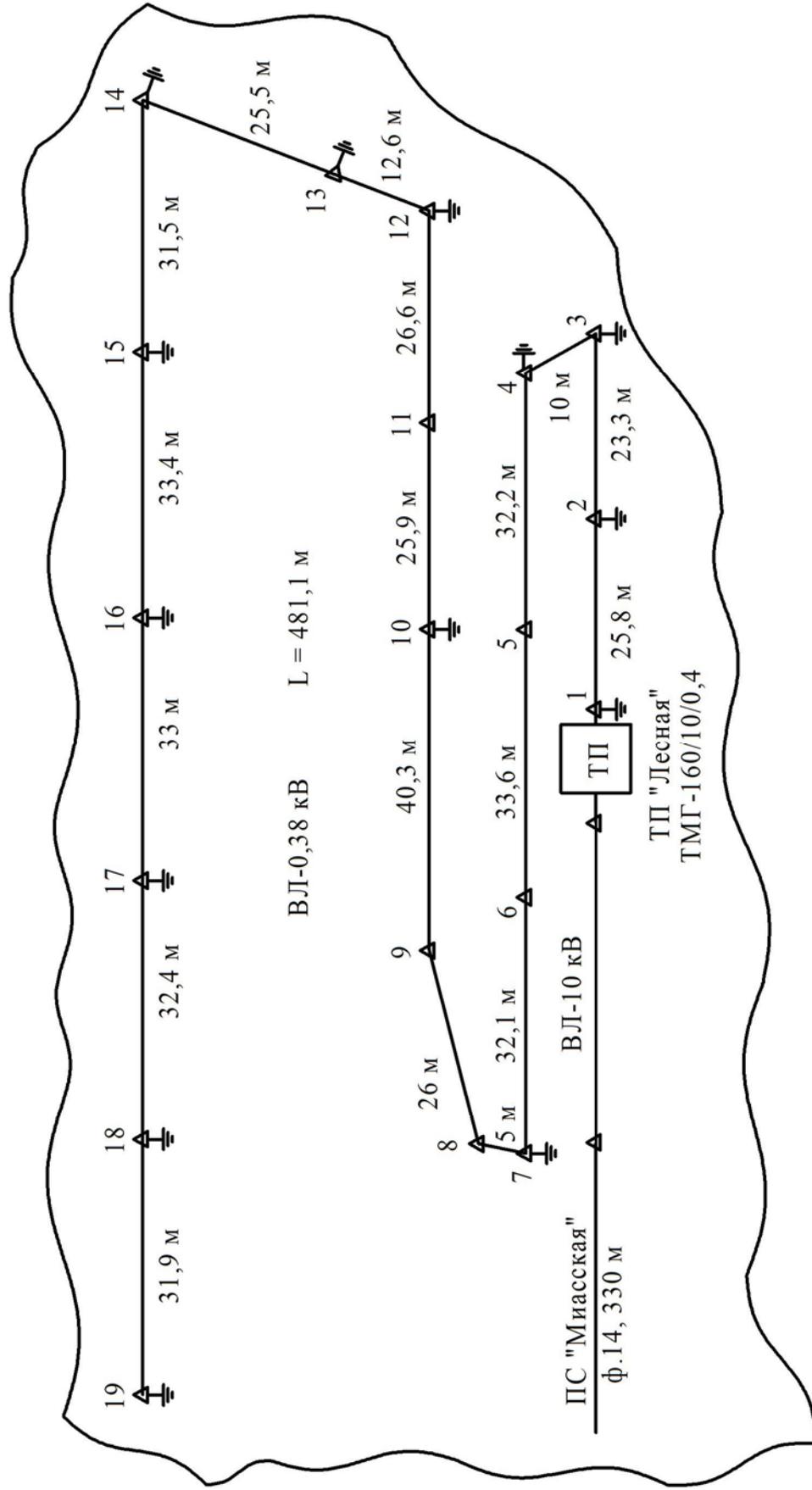
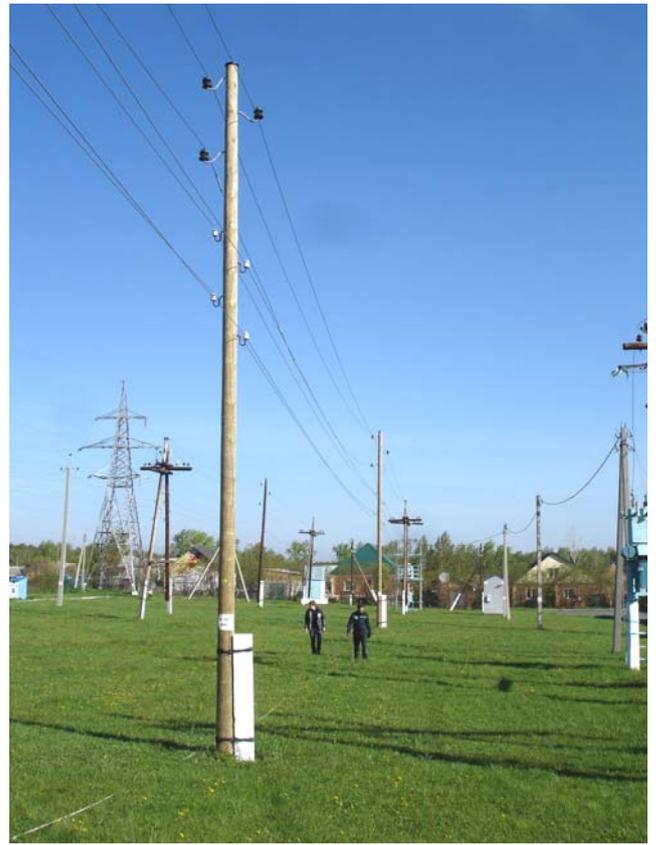


Рисунок 3.11 – План размещения опытной электрической сети напряжением 380 В на полигоне «Челяб-энерго»



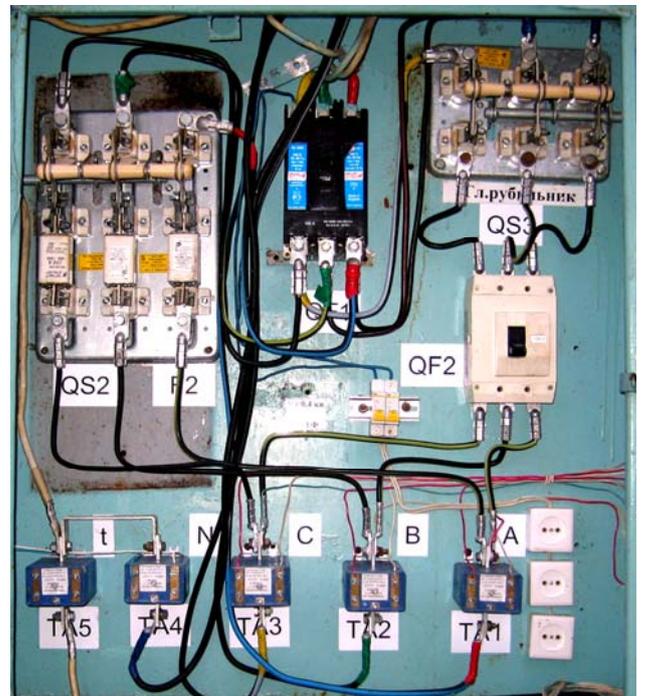
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.12 – Внешний вид опытной электрической сети напряжением 380 В

Таблица 3.6 – Спецификация на оборудование, установленное в опытной электрической сети

Обозначение	Оборудование	Параметры	Количество
QF1	Автоматический выключатель типа АЕ 2066-100-00 с тепловым и электромагнитным расцепителями	250 А	1
QS2, QS3	Рубильник	100 А	2
F2	Предохранитель типа ПН-2	100 А	3
QF2	Автоматический выключатель типа ВА04-36 с тепловым и электромагнитным расцепителями	100 А	1
ТА1–ТА5	Трансформатор тока типа ТОП 0,66 кВ	200/5 А, класс 0,5	5
ХТ	Клеммник	10 клемм токовых, 10 клемм напряжения	1
QF3	Автоматический выключатель	25 А	1
	Розетки 220 В		3

– измерения токов, протекающих по фазным и нулевому проводам, а также по проводнику, соединяющему нейтраль вторичной обмотки трансформатора с заземляющим устройством ТП. Установлены соответственно трансформаторы тока ТА1–ТА5, вторичные обмотки которых выведены на токовые клеммы;

– измерения напряжений фаз относительно нулевого провода и относительно «земли». На клеммник выведены соответствующие потенциальные точки трансформаторной подстанции;

– подключения различного рода измерительных приборов.

При проведении экспериментов необходимо чёткое знание расположения фазных и нулевого проводов на разных опорах, которое показано на рисунке 3.14. Принято рассмотрение опор «от ТП в линию», т.е. находясь спиной к ТП, можно определить расположение фазных и нулевого проводов на опоре.

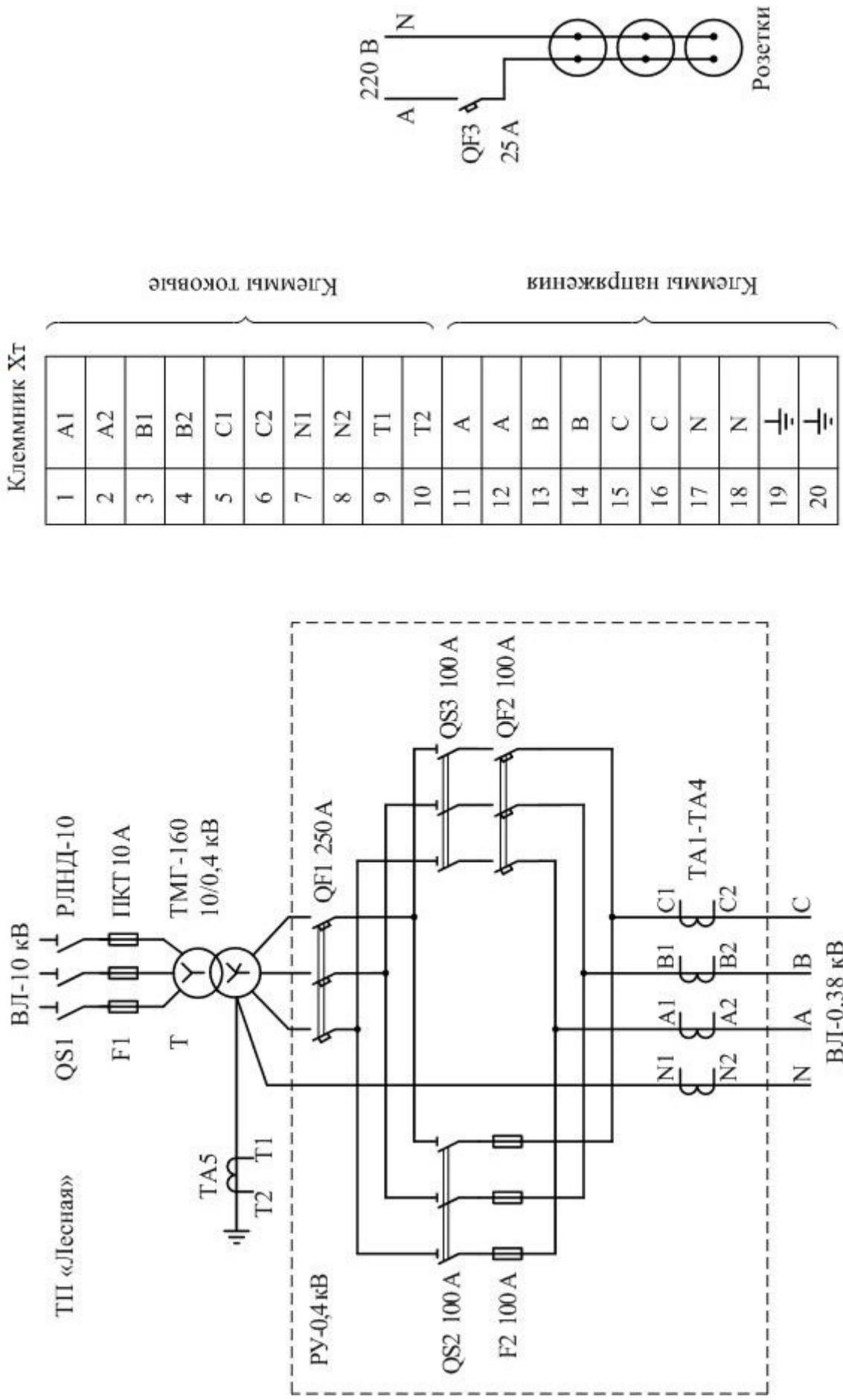
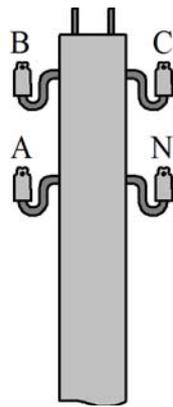
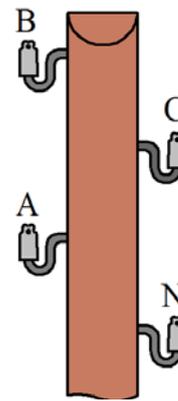


Рисунок 3.13 – Схема трансформаторной подстанции «Лесная» с распределительным устройством 0,4 кВ



Опоры 1–3, 7, 8, 11–19



Опоры 4, 5, 6, 9, 10

Рисунок 3.14 – Расположение нулевого и фазных проводов на опорах – вид на опору от ТП в линию

Опытная электрическая сеть в соответствии с требованиями ПУЭ имеет заземляющие устройства (ЗУ) с сопротивлениями в трансформаторной подстанции – $R_{ЗУ.ТП}$ (нейтраль трансформатора ТМГ соединена с $R_{ЗУ.ТП}$), у потребителя $R_{ЗУ.П}$ (нулевой провод соединён с $R_{ЗУ.П}$) и повторные заземлители – $R_{П}$ опор воздушной линии напряжением 380 В. Выборочные измерения сопротивлений указанных заземлений проведены службой изоляции и защиты от перенапряжений ПО «Центральные электрические сети» 25 мая 2013 г. Результаты замеров приведены в таблице 3.7. Сопротивление заземляющего устройства потребителя $R_{ЗУ.П}$ для проведения различных экспериментов можно изменять в широких пределах 5–30 Ом.

Трёхфазная нагрузка в конце линии Н2 (рисунок 3.15) состоит из резисторов, которые выполнены из ленточного или круглых проводников. Из ленточных резисторов выполнены первые три ступени каждой из трёх фаз нагрузки. Эти сопротивления могут длительно выдерживать ток до 30 А, а в течение 3–5 минут – ток до 50 А. Ступени с 4-й по 8-ю двух фаз выполнены из проволочных резисторов, которые длительно могут выдержать ток 5 А. Параметры нагрузки приведены в таблице 3.8.

Данные таблицы 3.7 свидетельствуют о том, что в конце линии можно получить максимальную симметричную трёхфазную нагрузку $P_{З.Ф.МАКС} = 32,7$ кВт или максимальную однофазную – $P_{Ф.МАКС} = 10,9$ кВт. Минимальные нагрузки на

двух фазах равны $P_{\Phi, \text{МИН}} = 0,5 \text{ кВт}$, т.е. можно получить диапазон регулирования нагрузки в конце линии в процентах от 4,63 до 100 %.

Таблица 3.7 – Параметры заземляющих устройств (ЗУ) ТП, ВЛ 380 В и нагрузки

ЗУ	R, Ом	Тип опоры	ЗУ	R, Ом	Тип опоры
$R_{\text{ЗУ.ТП}}$	1,84	–	$R_{\text{П12}}$	22,3	Б
$R_{\text{П1}}$	29,2	ЖБ + П	$R_{\text{П14}}$	5,6	Б
$R_{\text{П3}}$	27,4	Б	$R_{\text{П16}}$	17,1	Б
$R_{\text{П7}}$	25,3	ЖБ + П	$R_{\text{П17}}$	17,0	Б
$R_{\text{П10}}$	26,8	Б	$R_{\text{ЗУ.П}}$	5–30	–

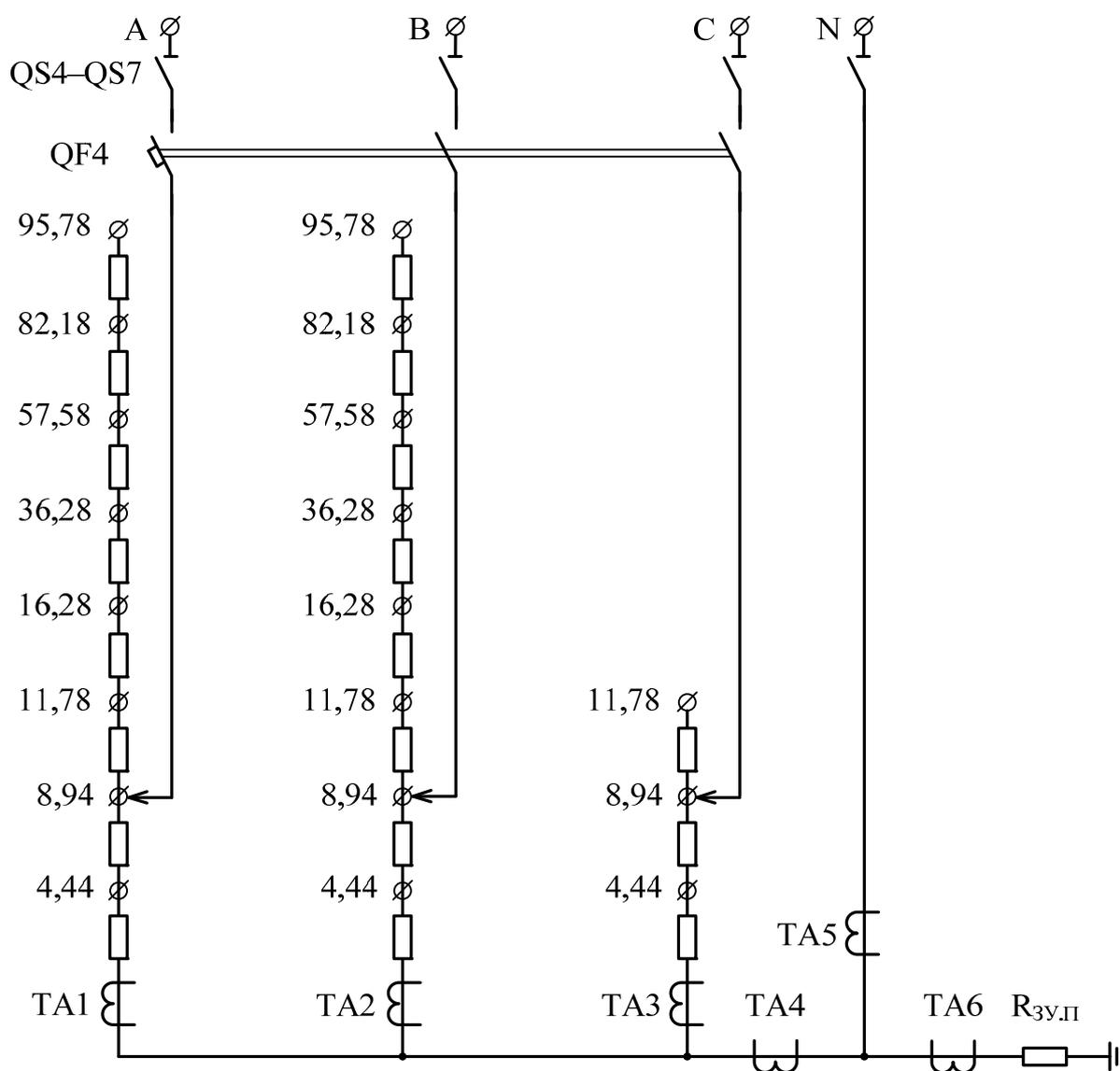


Рисунок 3.15 – Схема соединения нагрузочных сопротивлений

Таблица 3.8 – Параметры электрической нагрузки в опытной электрической сети

№ п/п	R_{Φ} , Ом	I_{Φ} , А	P_{Φ} , кВт	$P_{3,\Phi}$, кВт
1	4,44	49,55	10,9	32,7
2	8,94	24,61	5,41	16,24
3	11,78	18,67	4,11	12,33
4	16,28	13,51	2,97	–
5	36,28	6,06	1,33	–
6	57,58	3,82	0,84	–
7	82,18	2,677	0,59	–
8	95,78	2,296	0,505	–

3.5 Исследование режимных параметров в опытной электрической сети при однофазных коротких замыканиях

Для определения зависимости тока ОКЗ от расстояния между источником (ТП) и точкой КЗ на линии, которая необходима для построения токовых защит и проверки адекватности работы компьютерной модели сети, в опытной электрической сети были проведены измерения режимных параметров (токов и напряжений) при ОКЗ в различных точках ВЛ, в том числе и в конце ВЛ.

Измерение величины тока ОКЗ и других параметров проводились в два этапа:

1. Косвенное измерение тока ОКЗ на вводах низкого напряжения силового трансформатора и опорах №4, 10, 15 и 19 с помощью прибора ИФН-200.

2. Прямое измерение тока ОКЗ на опорах №10 и 19 с использованием измерительных комплектов «Ресурс-UF2М».

Измерение металлического однофазного короткого замыкания в различных точках воздушной линии опытной электрической сети напряжением 380 В прямым методом производилось по схемам, изображенным на рисунках 3.16 и 3.17.

Искусственное однофазное металлическое короткое замыкание на опорах № 10 и 19 создавалось путем соединения фазы А и рабочего нулевого провода проводом марки СИП4-1х70 длиной примерно 15 м (рисунок 3.16). Это было

сделано для удобства подключения измерительных приборов и для безопасности проведения эксперимента.

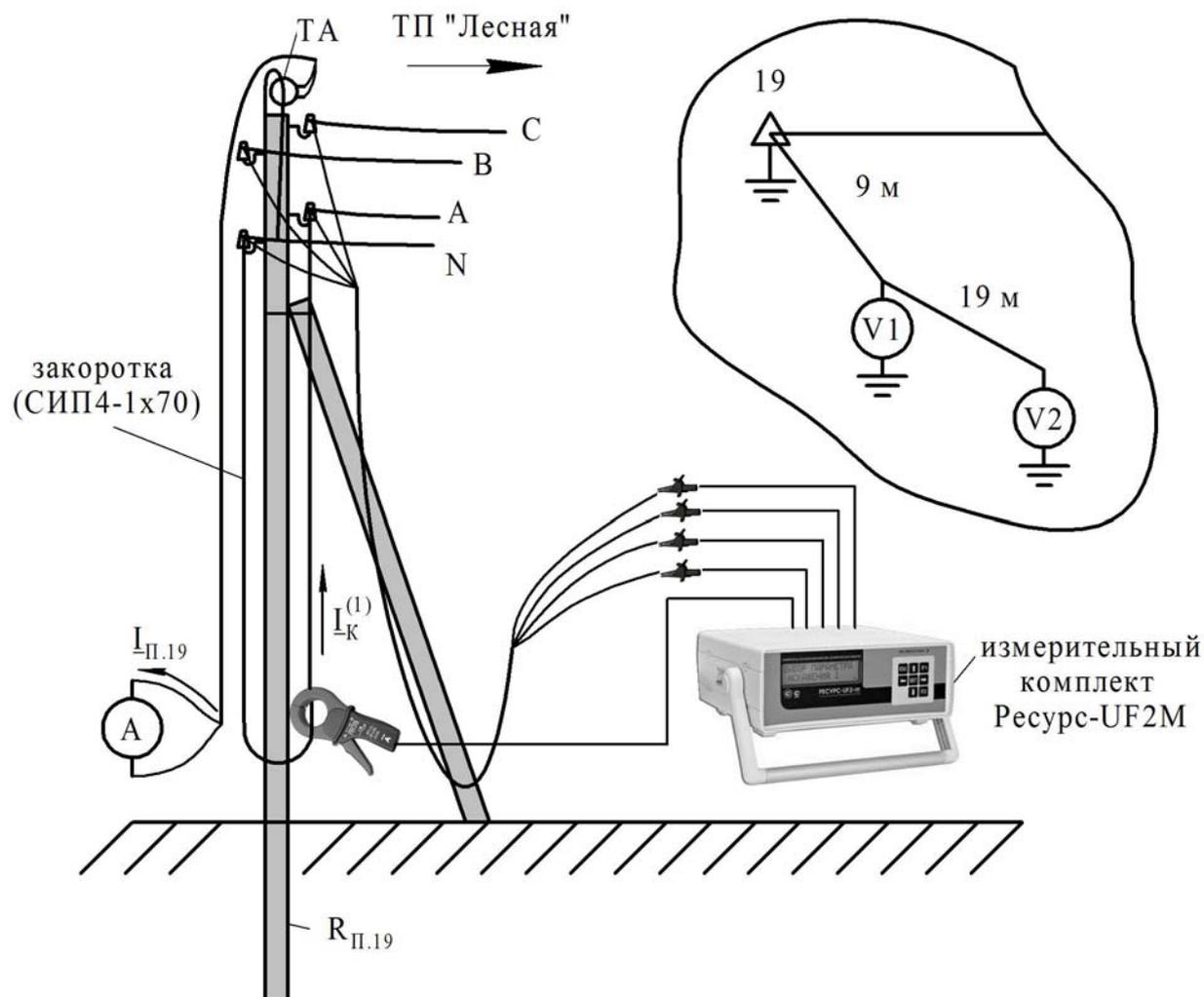


Рисунок 3.16 – Схема подключения измерительных приборов у опоры № 19

Регистрация изменения напряжений в фазных проводах и тока в поврежденной фазе производилось измерительным комплектом «Ресурс-UF2М».

Измерение тока в повторном заземлителе во время протекания тока ОКЗ производилось амперметром (рисунок 3.16), подключенного к трансформатору тока ТА. Трансформатор тока находился на опоре откуда были опущены измерительные провода на землю к амперметру с диапазоном измерения тока 2 А.

Кроме замера величины тока ОКЗ проводилось измерение напряжений в трех фазах, ток в повторном заземлении и распределение потенциала «земли» относительно повторного заземления на расстоянии примерно 9 и 19 м. Измерение распределения потенциала проводилось путем подключения 2-х вольтметров на расстоянии от опоры на 9 и 19 м (рисунок 3.16).

Одновременно проводились измерения на трансформаторной подстанции ТП «Лесная» (рисунок 3.17.) Отличие состояло в том, что измерительным комплектом «Ресурс-UF2М» проводилось измерения тока в фазном и нулевом проводах, а также ток, протекающего по заземляющему устройству ТП. Также проводилось измерение распределения потенциала относительно заземляющего устройства трансформаторной подстанции путем подключения 2-х вольтметров на расстоянии 10 и 20 м.

Для получения информации о токе однофазного короткого замыкания и времени его протекания использовались временные диаграммы, полученные с помощью измерительного комплекта «Ресурс-UF2М», одна из которых представлена на рисунке 3.18.

Результаты замеров приведены соответственно в таблицах 3.9–3.11.

Таблица 3.9 – Результаты замеров токов ОКЗ на опорах №9 и №10,

Номер опыта	$I_{зу.тп}, A$	$I_{п10}, A$	$I_{п19}, A$	$I_{к}^{(1)}, A$	Потенциал относительно повторного заземления (В) на расстоянии (м)		Потенциал относительно заземляющего устройства ТП (В) на расстоянии (м)	
					9 м	19 м	10 м	20 м
ОКЗ на опоре № 19								
1	13,2	-	3,32	230	50	55	19	23,5
2	13,2	-	3,32	230	50	55		
ОКЗ на опоре № 10								
3	14,38	-	-	396,3	35	37	21	25
4	14,56	-	-	402,8	35	37		
5	14,33	1,04		393,7	37	38		
6	14,26	0,96		395	35	37		

Таблица 3.10 – Результаты замеров в опытной электрической сети

Номер опыта	Тип защитного аппарата	$I_K^{(1)}$, А	$t_{откл.}$, С	$K = \frac{I_K^{(1)}}{I_{НОМ.3}}$	$\frac{Z_K^{(1)}}{3}$, Ом
1	ПН2-100	222,6	105,86 (не откл.)	2,2	1,033
2	ПН2-100	222,2	55,4 (не откл.)	2,2	1,035
3	ПН2-100	396,3	3,92	3,96	0,58
4	ПН2-100	402,8	0,72	4,03	0,571
5	ВА04-36	393,7	13,78	3,94	0,584
6	ВА04-36	395,0	10,3	3,95	0,582

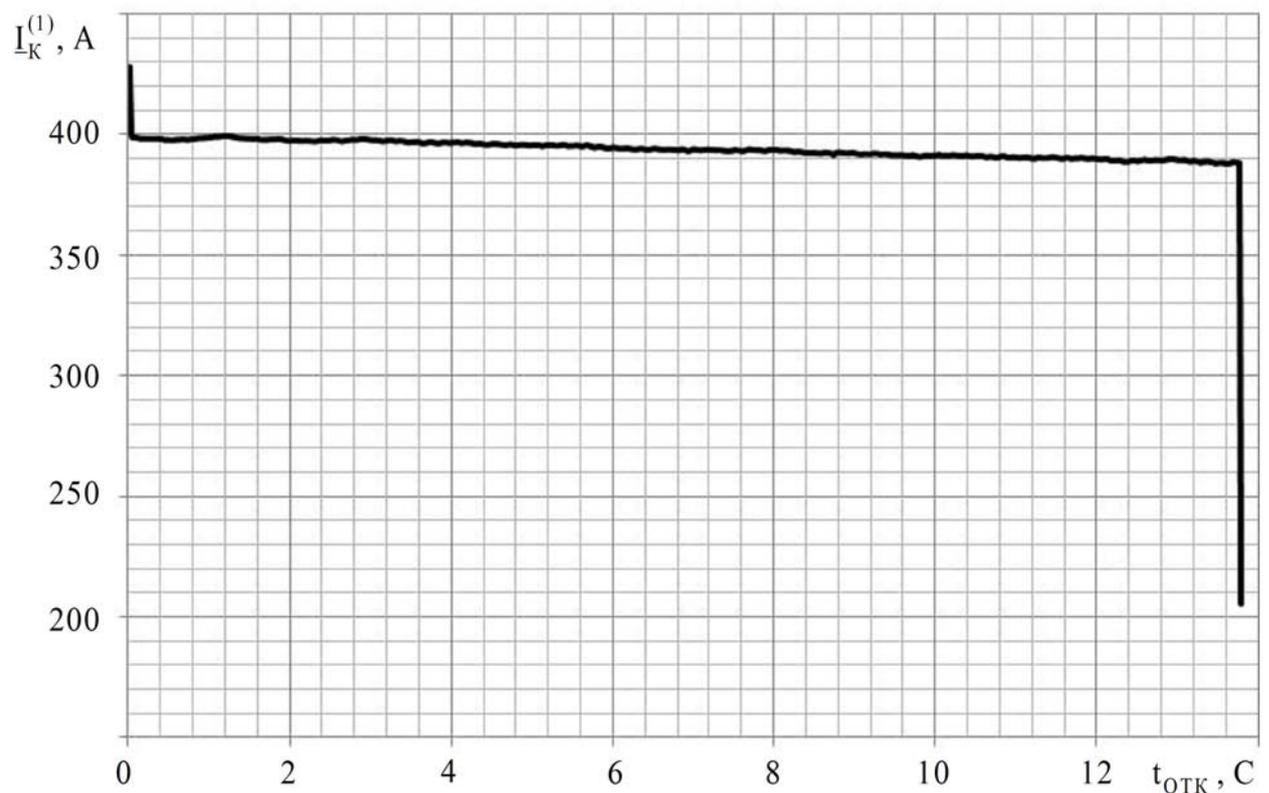


Рисунок 3.18. – Временная диаграмма изменения тока ОКЗ в ходе опыта № 5 при ОКЗ на 10-й опоре

Таблица 3.11 – Нагурные замеры токов ОКЗ в опытной электрической сети

Фаза	Среднеквадратичное значение напряжения за период наблюдения $T_{\text{НАБЛ}}$ в начале линии электропередачи, В			Среднеквадратичное значение напряжения за период наблюдения $T_{\text{НАБЛ}}$ в месте короткого замыкания (в конце линии электропередачи), В			Средне-квадратичное значение тока ОКЗ за период наблюдения $T_{\text{НАБЛ}}$, А	Период на-блюдения, с
	U_A	U_C	U_B	U_A	U_C	U_B		
	На опоре 19							$T_{\text{НАБЛ}}$
A	181,55	234,4	279,1	2,6	307,9	322,48	222,2	55,36
A	181,67	234,44	278,96	2,63	307,79	322,392	222,2	105,82
AB (двух-фазное КЗ)	218,68	232,02	219,16	122,23	127,93	231,1	447,41	10,52
На опоре 10								
A	155,81	246,18	295,29	4,68	313,117	325,016	397,5	3,84
A	155,94	246,7	296,02	4,68	313,65	324,61	393,07	0,66
A	157,23	245,86	295,24	4,8	320,9	333,6	394,47	13,68
A	158,14	247,13	296,34	4,73	314,18	325,86	395,9	10,64
На опоре 15								
B	-	-	-	316,26	14,75	329,92	288	3
B	-	-	-	314,53	14,6	327,83	288	3,2
B	-	-	-	316,78	14,8	330,21	288	2,38
На опоре 7								
A	-	-	-	26,37	315,86	327,53	511,73	5,48
A	-	-	-	26,47	315,49	327,76	509,25	4,32
A	-	-	-	25,39	318,15	329,49	511,23	1,2
A	-	-	-	26,89	316,05	326,96	509,18	4,06

В таблице 3.12 представлены сводные данные по токам однофазного короткого замыкания опытной электрической сети напряжением 380 В, полученные:

- по результатам расчёта;
- при прямом замере при создании металлического однофазного короткого замыкания;
- при косвенном измерении с помощью прибора ИФН-200.

Таблица 3.12 – Сводные результаты расчетов и замеров токов металлического однофазного короткого замыкания

Номер опоры	Длина участка, м	Данные расчёта, А	Прямой замер, А	ИФН-200, А
1	0	1037,0	–	738
2	25,8	942,9	–	–
3	49,1	866,3	–	–
4	59,1	833,8	–	570
5	91,3	689,3	–	–
6	124,9	582,3	–	–
7	157	506,6	510	–
8	162	498,4	–	–
9	188	451,7	–	–
10	228,3	394,3	396	358,4
11	254,2	364,4	–	–
12	280,8	339,7	–	–
13	293,4	330,7	–	–
14	318,9	311,7	–	–
15	350,4	292,5	288	281,8
16	383,8	273,6	–	–
17	416,8	257,7	–	–
18	449,2	243,9	–	–
19	496,1	230,1	230	228,7

На рисунке 3.19 показаны токи однофазного короткого замыкания, полученные расчётным путём, прямым и косвенным замерами.

Из рисунка 3.19 видно расхождение значений токов, полученных расчётным путём и в результате прямых замеров, с результатами косвенных замеров с помощью прибора ИФН-200. Это объясняется тем, что в первых двух случаях сопротивления силового трансформатора, в частности, сопротивление нулевой

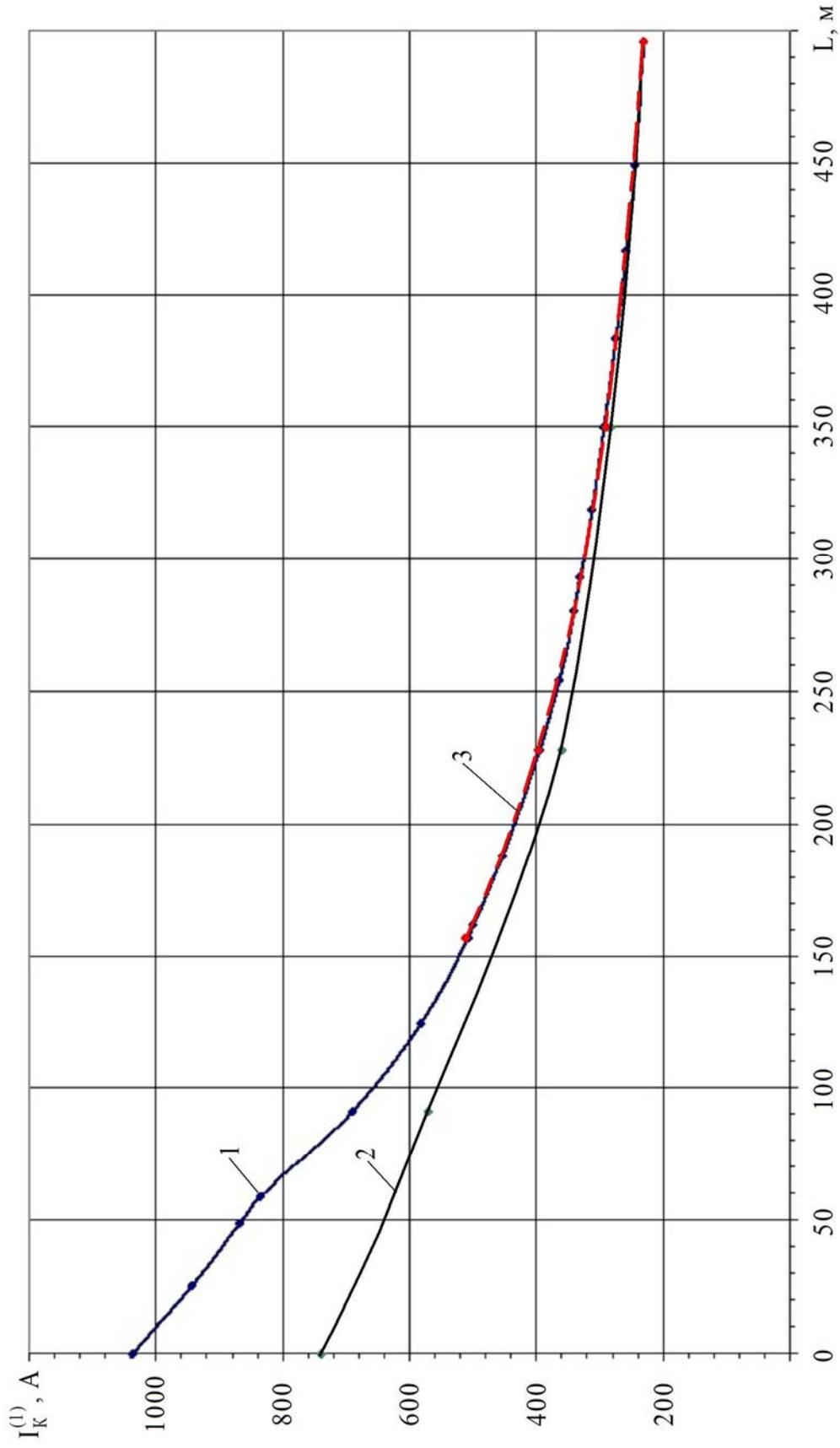


Рисунок 3.19 – Зависимость изменения величины тока ОКЗ от расстояния между ТП и местом возникновения КЗ: 1 – расчетная кривая; 2 – по результатам замеров ИФН-200; 3 – по результатам прямых замеров при металлическом ОКЗ

последовательности, рассматриваются при воздействии на них фазного напряжения сети [75].

Аналогичные результаты в расхождении измеренных токов с помощью прибора ИФН-200 с прямыми замерами токов получены и для физической модели электрической сети.

3.6 Разработка методики и программы проведения экспериментальных исследований в действующих электрических сетях

Целью проведения экспериментальных исследований на реальном объекте является получение объективной информации о параметрах воздушной линии напряжением 380 В (ВЛ 380 В) при различных режимах её работы. Известно, что методически грамотно подготовленный эксперимент в реальных электрических сетях делает его более эффективным. В настоящее время универсальной методики проведения экспериментов в реальных сетях с воздушными линиями напряжением 380 В нет. Кроме того, следует отметить, что создать такую методику практически невозможно из-за большого многообразия вопросов, которые приходится решать в процессе эксплуатации таких сетей. Поэтому возникает необходимость в написании методики проведения эксперимента в указанных сетях для конкретно решаемых задач.

Отметим, что проведение исследований в действующих электрических сетях является ответственным мероприятием и требует тщательной подготовки и решения организационно-технических вопросов. К ним можно отнести:

1. Подбор ВЛ 380 В совместно с эксплуатирующей организацией.
2. Сбор необходимых данных, таких как схема трансформаторной подстанции (ТП) с техническим паспортом силового трансформатора; принципиальная электрическая схема воздушной линии напряжением 380 В; сечения проводов и длины участков линии; параметры заземляющих устройств ТП, ВЛ и потребителей; мощности и схемы подключения нагрузок и т.д.

3. Разработка программы экспериментальных исследований и согласование её с эксплуатирующей организацией.

4. Организация во время проведения измерений отключений и включений потребителей, питающихся по выбранной для исследования воздушной линии.

5. Обеспечение безопасности лиц, принимающих участие в проведении экспериментов, согласно требованиям нормативных документов [69, 90, 91].

Одним из важных организационных мероприятий является разработка программы проведения экспериментов, содержание которой включает в себя следующие разделы:

- Объём экспериментальных исследований.
- Описание схемы эксперимента.
- Расстановка измерительных приборов в схеме.
- Перечень предварительных работ, необходимых для успешного проведения эксперимента.
- Описание последовательности проведения работ в процессе выполнения экспериментов.
- Типовые таблицы по занесению результатов измерений и их обработке.

Рассмотрим краткое содержание разделов программы проведения эксперимента.

Раздел «Объём экспериментальных исследований» содержит перечень режимов электрической сети, которые могут быть проведены без создания ситуаций, приводящих к повреждению электрооборудования потребителей, а также электрических сетей:

1. Нормальный режим работы воздушной линии при симметричной и несимметричной нагрузках.
2. Обрыв фазного провода в начале линии.
3. Обрыв фазного провода в конце линии.
4. Обрыв фазного провода в конце линии с замыканием его на землю.
5. Однофазное замыкание на землю в конце линии.

В разделе «Описание схемы эксперимента» приводятся:

– принципиальная электрическая схема трансформаторной подстанции напряжением 6–10/0,4кВ и электрической сети напряжением 380 В с указанием всех коммутационных аппаратов схемы, заземляющих устройств (рисунок 3.20).

– план размещения ВЛ 380 В на местности (рисунок 3.21).

– полная принципиальная трехфазная схема ВЛ 380 В с нанесением измеряемых во время эксперимента параметров сети (рисунок 3.22).

В разделе «Расстановка измерительных приборов в схеме» указываются места установки измерительных приборов, схемы их подключения и требования по электробезопасности при проведении замеров в действующих электрических сетях. В частности, на рисунке 3.23 показана схема подключения измерительного комплекса «Ресурс-2UF2M».

В разделе «Перечень предварительных работ» приводится описание тех мероприятий, которые необходимо выполнить до проведения основной части эксперимента, таких как:

- измерение сопротивлений заземляющих устройств ВЛ и ТП;
- измерение токов однофазного короткого замыкания и сопротивлений петли «фаза-нуль»;
- измерение сопротивления одиночного заземлителя для создания режима однофазного замыкания на землю.

С целью обеспечения условий электробезопасности дополнительно к программе разрабатывается регламент проведения экспериментов, в котором указываются: последовательность действий при выполнении замеров в различных режимах работы электрической сети; конкретные организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ; ответственные лица за выполнение отдельных пунктов эксперимента [69].

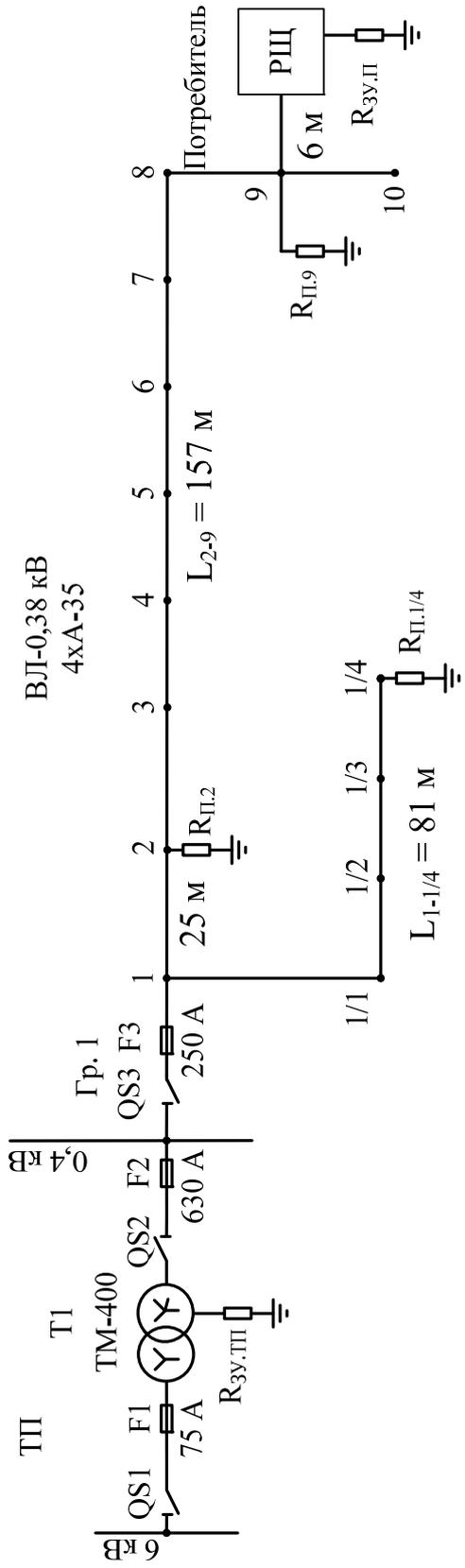


Рисунок 3.20 – Принципиальная электрическая схема ВЛ 380 В

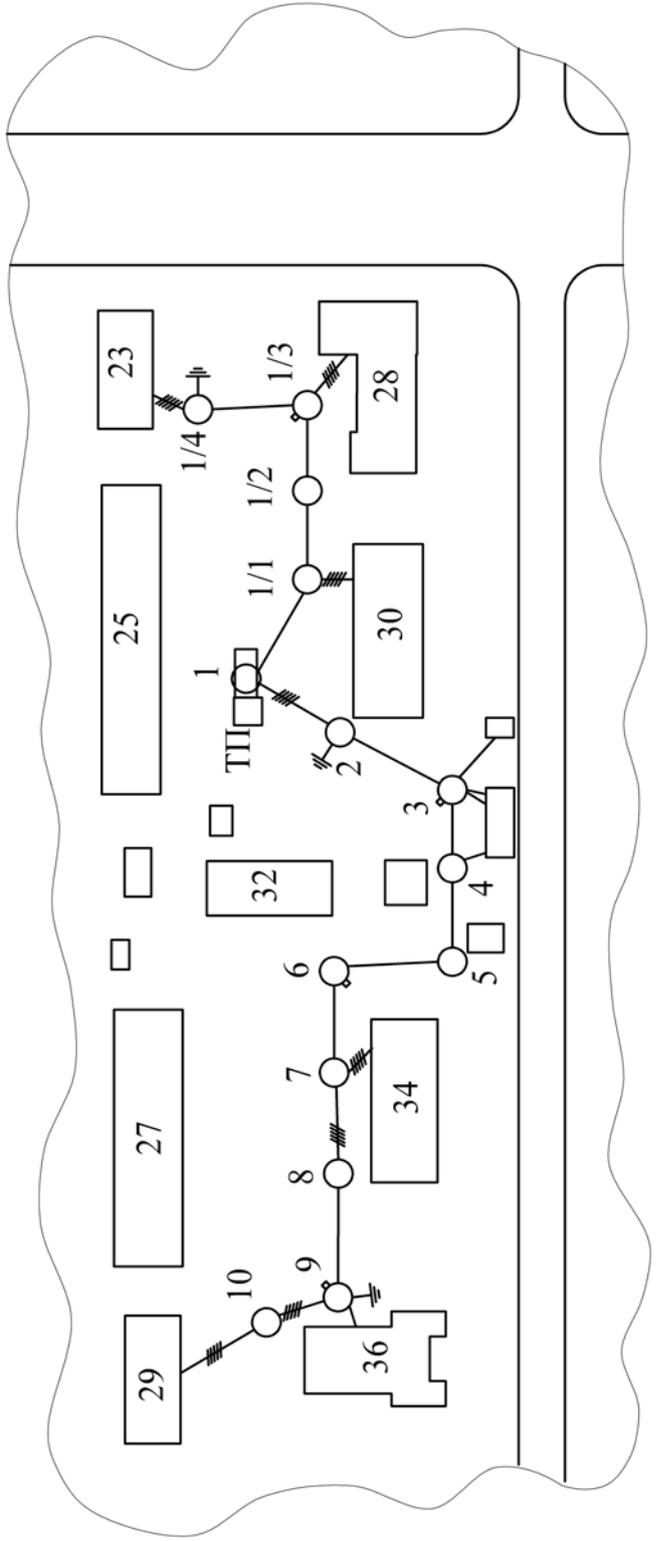


Рисунок 3.21 – План размещения ВЛ 380 В на местности

4. ОБРЫВ ФАЗНОГО ПРОВОДА В КОНЦЕ ЛИНИИ И ЕГО ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

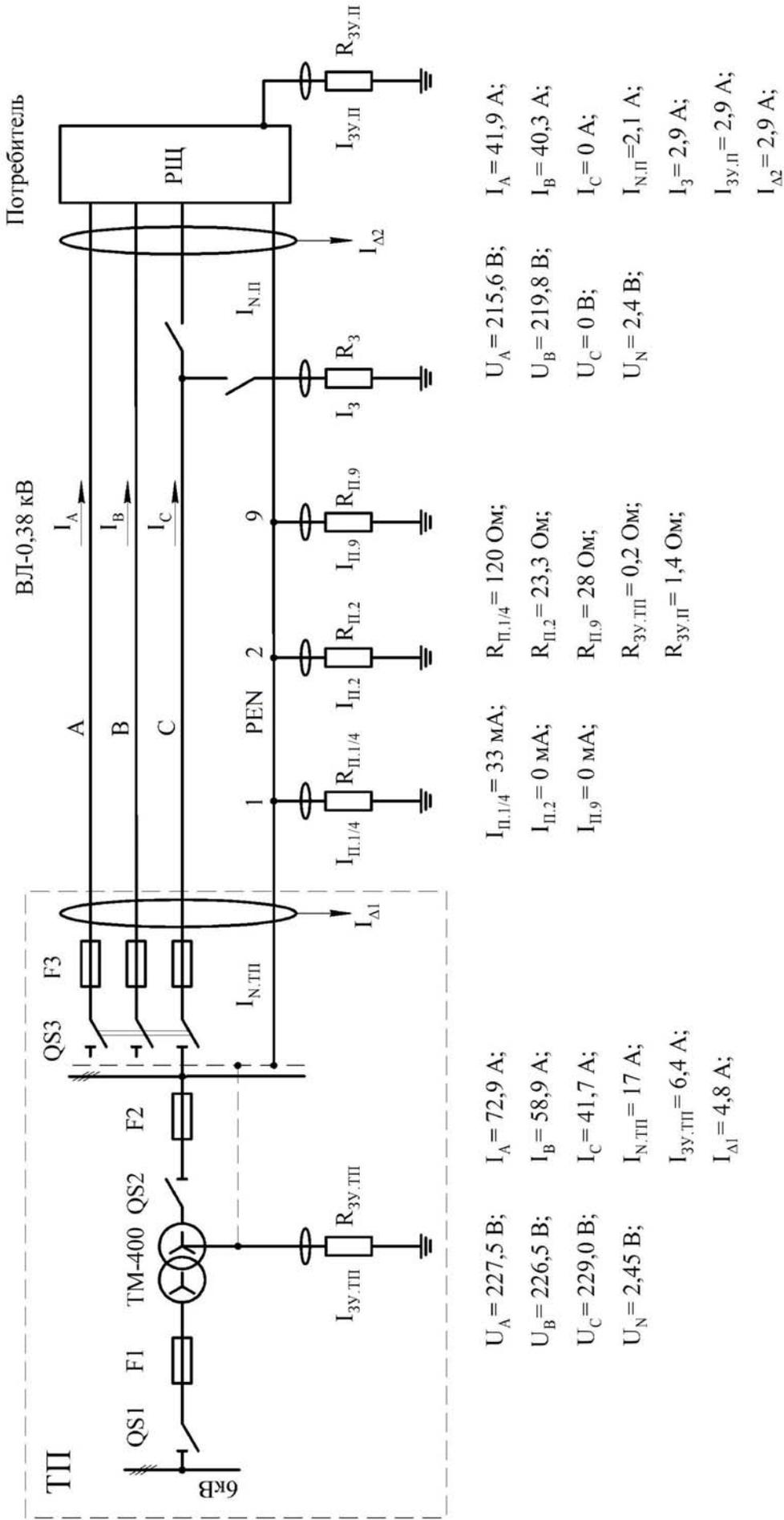


Рисунок 3.22 – Принципиальная трехфазная схема ВЛ 380 В, с указанием измеряемых величин

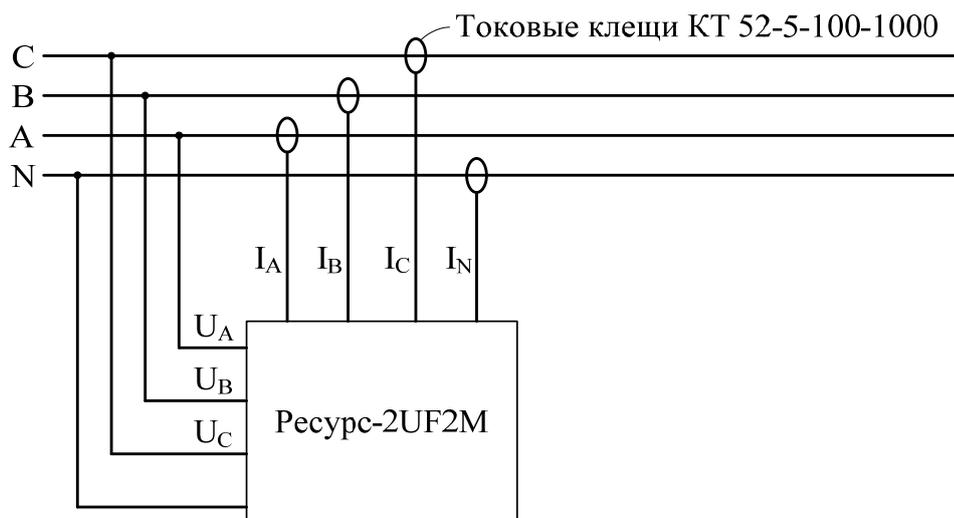


Рисунок 3.23 – Схема подключения измерительного комплекта «Ресурс-2UF2М»

Кроме того, регламент позволяет скоординировать работу, уменьшить вероятность нарушения последовательности измерений и, как следствие, сократить время проведения экспериментов.

Рассмотрим подробнее раздел программы «Объем экспериментальных исследований», требующий дополнительного внимания и пояснений.

1. Обрыв фазного провода в начале воздушной линии может быть создан извлечением одного из трех предохранителей F3 (рисунок 3.22).

2. Обрыв фазного провода в конце линии имитируется снятием одного фазного провода между 9-й опорой и вводом в здание потребителя (рисунки 3.21 и 3.22).

3. Для имитации режима однофазного замыкания на землю через сопротивление R_3 специально в конце участка сети между 9-й опорой и зданием потребителя забивается одиночный электрод (рисунок 3.22).

С целью измерения тока, протекающего по этому заземлителю R_3 , следует устанавливать трансформатор тока ТА. Во избежание попадания участников измерений под «шаговое» напряжение амперметр, подключенный к трансформатору тока, желательно вынести на расстояние от заземлителя 10 м (рисунок 3.24), а территория вокруг этого заземлителя должны быть огорожена в соответствии с требованиями Правилами безопасности.

4. Об обрыве нулевого провода. Данный эксперимент в реальной сети проводить опасно, так как существует большая вероятность возникновения перенапряжений, особенно опасных для электрооборудования потребителей, получающих питание от ВЛ 380 В.

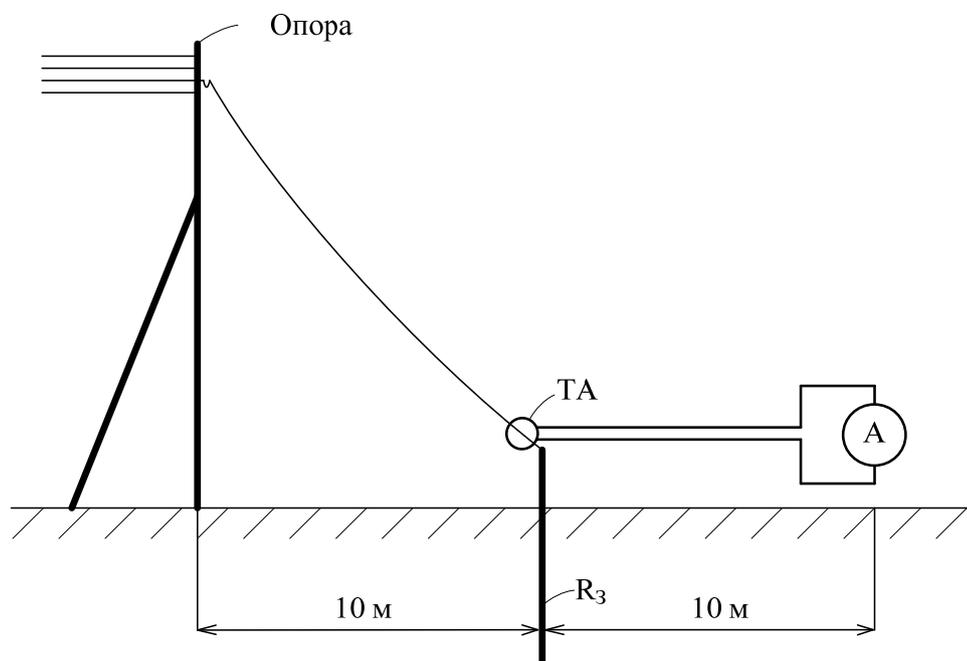


Рисунок 3.24 – Схема измерения тока, протекающего по искусственному заземлителю R_3

Измерения должны проводиться с учетом методических рекомендаций, отраженных в нормативных документах, регламентирующих организацию, объем и нормы испытания электрооборудования и аппаратов, принятых при эксплуатации электрических сетей Российской Федерации, а также электроустановок потребителей [90, 91, 102].

Измерения в реальных сетях с воздушными линиями напряжением 380 В следует выполнять в два этапа – подготовительный и основной.

На первом этапе замеряются сопротивления заземляющего устройства трансформаторной подстанции, повторных заземлителей, заземляющего устройства потребителя и одиночного заземлителя, предназначенного для имитации однофазного замыкания на землю. Для проведения измерений сопротивлений заземляющих устройств может использоваться измеритель заземления Ф4103-М1 [102].

Для измерений токов однофазного короткого замыкания в разных точках электрической сети (например, в РУ-0,4 кВ ТП и в конце ВЛ 380 В) может использоваться измеритель петли «фаза-нуль» ИФН-200, который, кроме определения токов однофазного короткого замыкания позволяет измерять следующие параметры:

- фазное напряжение в момент измерения U_{ϕ} , В;
- угол ϕ между напряжением и током при однофазном коротком замыкании;
- полное $Z_{\phi-N}$, активное $R_{\phi-N}$ и индуктивное $X_{\phi-N}$ сопротивления петли «фаза-нуль» для разных точек электрической сети, после чего можно выделить и рассчитать сопротивление силового трансформатора и воздушной линии.

На втором, основном этапе эксперимента с целью получения максимального объема информации о параметрах электрической сети, следует использовать самые различные измерительные средства, начиная от специальных измерительных комплексов и штатно установленных приборов до различного рода измерительных токовых клещей.

Для измерения параметров в начале и конце линии могут быть использованы измерительные комплекты типа «Ресурс-UF2М», которые предназначены для измерения целого комплекса режимных параметров сети таких как:

- действующие значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, включая основные показатели качества электрической энергии (ПКЭ) по ГОСТ 13109-97;
- действующие значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- мощность и энергия переменного трехфазного и однофазного тока.

Применяемые в электрических сетях современные микропроцессорные счетчики электрической энергии, например, «Меркурий», «Матрица», «Энергомера» и другие позволяют получать дополнительно довольно широкий объем информации, включающий, в частности, информацию о векторных значениях фазных напряжений и токов, передаваемой мощности и т.д.

Измерения токов, протекающих в заземляющем устройстве трансформатора, в повторных заземлителях, а также дифференциальных токов можно провести токовыми клещами с различными диапазонами измерения. Например, по заземляющим устройствам трансформаторной подстанции и потребителей протекают токи, измеряемые единицами и десятками ампер, а по повторным заземлителям ВЛ 380 В – миллиамперами. Поэтому, с одной стороны, должны быть использованы цифровые клещи с диапазонами измеряемых токов 10–100 А типа Sonel SMP-1, а во втором – с диапазоном от 4 мА и более типа KEW Snap 2432.

Совокупность исследований в реальной сети, на компьютерной и физической моделях, а также в опытной электрической сети позволят проводить более детальный анализ режимов работы электрической сети, оценивать возможности существующих защит и разрабатывать новые.

3.7 Выводы

1. Проведённые на компьютерной модели исследования режимных параметров, в том числе и потенциалов нулевого проводника, при ОКЗ в различных точках ВЛ 380 В позволили не только подтвердить известные характерные картины эпюр распределения потенциалов нулевого провода, но и оценить их количественные показатели. Так, максимальные значения указанных потенциалов возрастают по мере заземлителей, так и при их отсутствии, и достигают опасных для людей и животных величин. Другими словами в системе TN-C ОКЗ существенно снижает уровень электробезопасности.

2. Разработанные физическая и компьютерная модели электрической сети напряжением 380 В и исследования на них позволили сформулировать основные требования к опытной электрической сети напряжением 380 В.

3. Спроектированная нами и реализованная ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» опытная электрическая сеть напряжением 380 В, открывает новые возможности по исследованию аварийных режимов работы электрических, в частности, однофазных короткие замыканий и защиты от них.

4. Экспериментально установлено, что защитные аппараты (плавкие предо-

хранители или автоматические выключатели), размещённые в начале ВЛ 380 В обеспечивают её защиту на расстоянии 250–300 м согласно требованиям ПУЭ по времени отключения тока ОКЗ.

5. Разработанная методика проведения экспериментальных исследований в действующих электрических сетях позволяет организовать подготовку к безопасному проведению экспериментальных исследований в действующих электрических сетях напряжением 380 В.

4 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что широко применяемые на сегодняшний день плавкие предохранители и автоматические выключатели, установленные в начале воздушных линий напряжением 380 В, являются неэффективным средством защиты от однофазных коротких замыканий.

Для повышения эффективности работы защит, построенных на плавких предохранителях и автоматических выключателях, требуется разработка методики выбора параметров и мест расстановки указанных защит в сетях напряжением 380 В с воздушными линиями. Актуальность применения в качестве аппаратов защиты плавких предохранителей и автоматических выключателей заключается в их низкой стоимости и простой конструкции. Применение этих аппаратов защиты не требует капитальных вложений в реконструкцию релейной защиты существующих электрических сетей напряжением 380 В, кроме того, они просты в обслуживании. Следует отметить, что в сельских районах ощущается острая нехватка квалифицированного эксплуатационного персонала [10].

4.1 Разработка методики выбора параметров и мест расстановки токовых защит воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий

В основу разрабатываемой методики положен широко известный принцип секционирования линии электропередачи. Анализ литературных источников показал, что данный способ повышения эффективности токовых защит упоминался в статье Спешакова П.И., опубликованной ещё в 1939 г. в журнале «Электричество» [111]. Начиная, примерно, с этого момента вплоть до появления в 2003 г. ПУЭ

7-го издания главным критерием выбора параметров плавких предохранителей, секционирующих линию электропередачи, являлся коэффициент чувствительности, величина которого не должна была быть менее 3.

В предыдущих главах показано, что плавкие предохранители и автоматические выключатели, установленные в начале ВЛ 380 В, как правило, не обеспечивают требуемое ПУЭ 7-го издания время отключения (не более 5 с) при возникновении ОКЗ на удаленных участках.

Поэтому задача, которая была сформулирована нами, заключалась в разработке методики выбора параметров и мест расстановки плавких предохранителей, следование которой обеспечивающей требуемое время срабатывания при возникновении ОКЗ.

В основе разрабатываемой методики и выбора параметров защитных аппаратов лежат следующие положения:

1. Обеспечение отстройки токов срабатывания аппаратов защиты от максимального рабочего и пикового токов защищаемого участка воздушной линии электропередачи.

2. Расчёт минимального значения тока однофазного короткого замыкания в различных точках воздушной линии и построение зависимости тока однофазного короткого замыкания в функции длины линии.

3. Время отключения тока однофазного короткого замыкания автоматическими выключателями или плавкими предохранителями не должно превышать 5 секунд согласно п. 1.7.79 7-го ПУЭ 7-го издания [93].

4. Обеспечение селективности работы аппаратов защиты смежных участков воздушной линии.

В работе предлагается производить расчет токовых защит графическим методом, суть которого заключается в следующем:

1. Рассчитываются минимальные токи однофазного короткого замыкания с учетом сопротивления дуги в месте замыкания, эффекта «теплого спада» в различных точках ВЛ 380 В и их взаимного влияния.

2. Строится график функции изменения величины тока однофазного короткого замыкания от длины участка ВЛ 380 В между ТП и точкой ОКЗ.

3. Выбирается номинальный ток плавкой вставки предохранителя по условиям отстройки от рабочих и пиковых токов.

4. По паспортным времятоковым характеристикам плавких предохранителей ($t_{S,F} = f(I)$) и графику функции строится зависимость времени срабатывания плавкого предохранителя от длины воздушной линии ($t_{S,F} = f(L)$).

5. По графику функции $t_{S,F} = f(L)$ определяется зона защиты плавкого предохранителя, установленного в начале ВЛ 380 В, в которой обеспечивается время срабатывания не более 5 с.

6. Если установленный в начале ВЛ 380 В плавкий предохранитель не обеспечивает защиту всей линии, то в конце его зоны защиты устанавливается секционирующий плавкий предохранитель.

Рассмотрим поэтапно расчёт защиты воздушной линии электропередачи напряжением 380 В:

1. На первом этапе производится расчет величины тока ОКЗ в различных точках воздушной линии электропередачи напряжением 380 В с учетом эффекта теплового спада и сопротивления дуги в месте замыкания согласно рекомендациям, данным в главе 2.

В качестве примера на рисунке 4.1 приведена зависимость изменения минимального значения дугового ОКЗ в сети напряжением 380 В $I_{К,МИН}^{(1)}$ с учётом эффекта «теплового спада» от расстояния L между источником (ТП) и местом возникновения КЗ на ВЛ. Указанная сеть состоит из силового трансформатора ТМГ-160/10/0,4 со схемой соединения обмоток Y/Y_N и воздушной линии длиной 500 м, выполненной неизолированным проводом АС-3х35+1х35 мм².

2. На втором этапе выполняется расчет параметров аппаратов защиты с учётом:

а) отстройки номинального тока защитного аппарата от максимального рабочего тока защищаемого участка воздушной линии, т.е.

$$I_{3,Н} \geq I_{P,МАКС}, \quad (4.2)$$

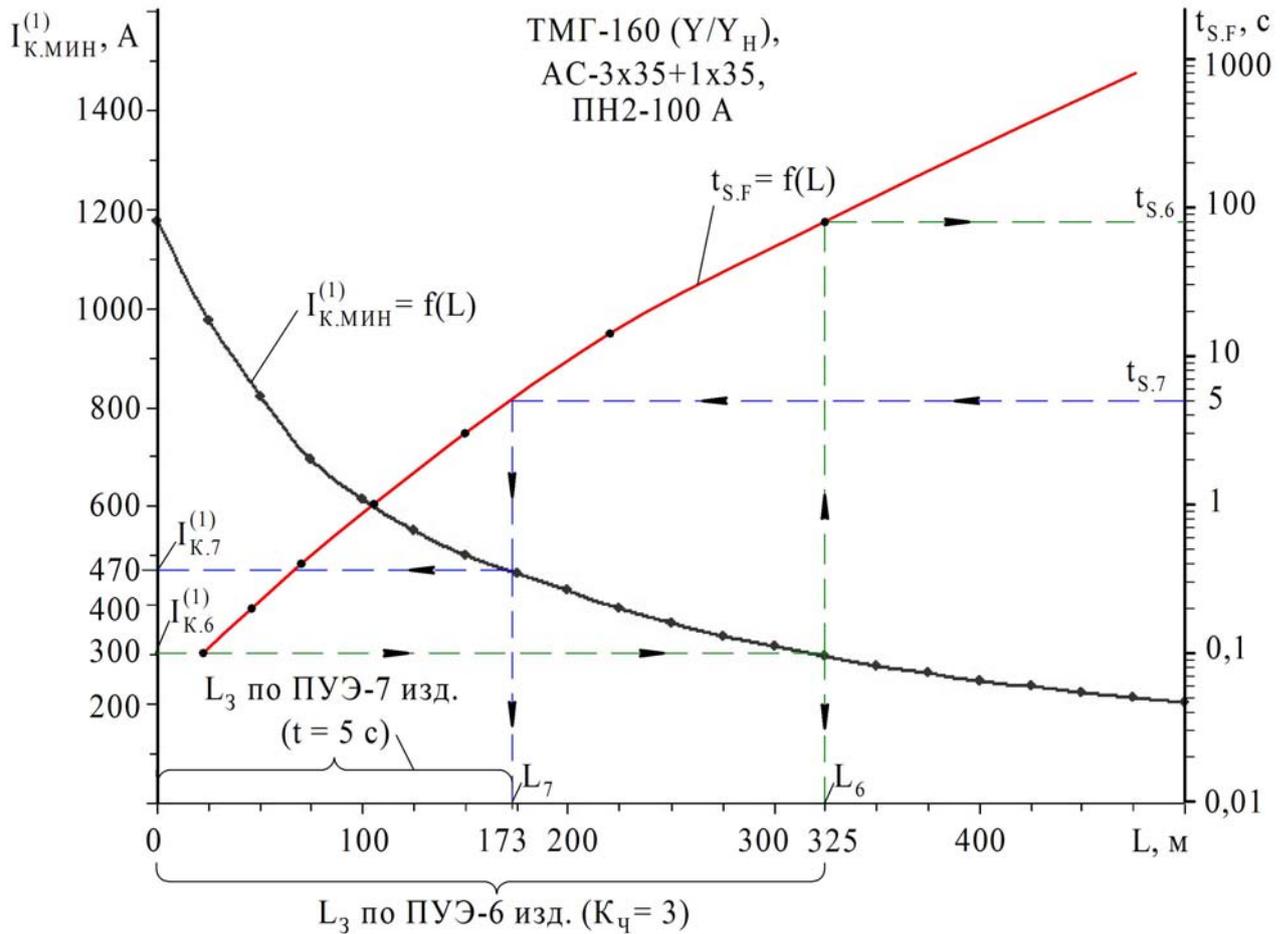


Рисунок 4.1 – Графическая интерпретация определения зоны защиты ВЛ с заданным временем срабатывания и наоборот

б) отстройки от пикового тока, защищаемого участка линии электропередачи

– для плавкого предохранителя

$$I_{F.H} \geq \frac{I_{\text{ПИК}}}{\alpha}, \quad (4.3)$$

где $I_{\text{ПИК}}$ – пиковый ток, А;

α – коэффициент, зависящий от условий пуска двигателей.

Поясним физическую сущность формулы (4.3). Экспериментально установлено, что плавкая вставка начинает стареть при токе, равном половине тока плавления ($I_{\text{ПЛАВ}}$) [59, 88, 135]. На основании этого плавкую вставку необходимо выбирать таким образом, чтобы она преждевременно не старела при возникновении в электрической сети пиковых токов.

Предположим, что пиковый ток протекает не более 1 с. Плавкая вставка предохранителя типа ПН-2 перегорает за 1 с при токе, равном $5I_{F.H}$. Тогда

$$I_{\text{ПИК}} = 0,5 \cdot 5 \cdot I_{F.H} = 2,5 \cdot I_{F.H}, \quad (4.4)$$

где $I_{F.H}$ – номинальный ток плавкой вставки.

Следовательно, ток плавкой вставки должен соответствовать неравенству, при соблюдении которого она не будет преждевременно стареть:

$$I_{F.H} \geq \frac{I_{\text{ПИК}}}{2,5}. \quad (4.5)$$

В общем случае, коэффициент, находящийся в знаменателе формулы (4.5), будет определяться индивидуально и зависит от тяжести пуска или самозапуска электроприёмников. Данная формула приводится в ряде научно-технической литературы [13, 17, 115, 135 и т.д.]. Определить пиковый ток можно по обобщенной формуле:

$$I_{\text{ПИК}} = \max_{j=1,N} \left[\sum_{i=1}^{m_j} I_{\text{ПУСК},ji} \right] + I'_{P.MAKCj}, \quad (4.6)$$

где N – число групп одновременно запускаемых электроприёмников;

m_j – число электроприёмников j -й группы, участвующих в одновременном запуске;

$I'_{P.MAKCj}$ – максимальный рабочий ток, обусловленный работой нагрузки всех электроприёмников, за исключением электроприёмников, участвующих в запуске;

$I_{\text{ПУСК},ji}$ – пусковой ток i -го электроприёмника в j -й группе ЭП, участвующих в одновременном j -м запуске.

3. На третьем этапе расчета, определяем зоны срабатывания и расстановки плавких предохранителей или автоматических выключателей по линии электропередачи и проверяем селективность срабатывания аппаратов защиты на смежных участках.

На данном этапе расчёты производятся графическим методом. На координатную плоскость наносится зависимость минимального значения тока ОКЗ

$I_{К.МИН}^{(1)}$ от расстояния L между ТП и точкой КЗ на линии, т.е. зависимость $I_{К.МИН}^{(1)} = f(L)$. Затем с использованием указанной зависимости и времятоковой характеристики выбранного защитного аппарата (в нашем случае плавкого предохранителя) строится зависимость времени его отключения t_{SF} от расстояния L , $t_{SF} = f(L)$. При установке на линии нескольких защитных аппаратов (предохранителей) с разными номинальными токами плавких вставок зависимости $t_{SF} = f(L)$ строятся для каждого из них, причём они строятся до тех пор, пока время отключения t_{SF} не станет меньше 5 с.

Например, на рисунке 4.1 для защиты воздушной линии в её начале установлен плавкий предохранитель типа ПН-2 с номинальным током $I_{F.H} = 100$ А, выбранный по условию отстройки от максимального рабочего и пикового токов линии. Используя защитные времятоковые характеристики плавкой вставки предохранителя типа ПН-2 с номинальным током $I_{F.H} = 100$ А (рисунок 4.2), построим зависимость времени отключения t_S плавкого предохранителя от расстояния между ТП и точкой короткого замыкания L на защищаемой линии. При построении зависимости $t_{SF} = f(L)$ (рисунок 4.1) использовалась верхняя времятоковая характеристика, соответствующая максимальному времени срабатывания плавкой вставки.

Произведем оценку защиты воздушной линии плавким предохранителем, установленным в начале линии (рисунок 4.1), при выборе параметров плавкой вставки по требованиям 6-го и 7-го изданий ПУЭ.

Согласно 6-му изданию ПУЭ минимальное значение коэффициента чувствительности должно быть равно трём – $K_{\text{ч}} = 3$ (все полученные переменные будем обозначать индексом – 6). Тогда допустимое минимальное значение тока ОКЗ в конце зоны действия плавкого предохранителя с номинальным током $I_{F.H} = 100$ А будет

$$I_{К.6}^{(1)} = K_{\text{ч}} \cdot I_{F.H} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ А}$$

Отложив по оси ординат значение тока $I_{К.6}^{(1)} = 300$ А и проведя горизонтальную линию до пересечения с кривой $I_{К.МИН}^{(1)} = f(L)$ (рисунок 4.1), получим длину

$L_6 = 325$ м, соответствующую концу зоны защиты плавкого предохранителя. Теперь, зная длину L_6 , по кривой $t_{SF} = f(L)$ (рисунок 4.1) определим время срабатывания плавкого предохранителя $t_{S,6} = 90$ с (рисунок 4.2), соответствующее требованиям пункта 1.7.79 6-го издания ПУЭ к защитным аппаратам.

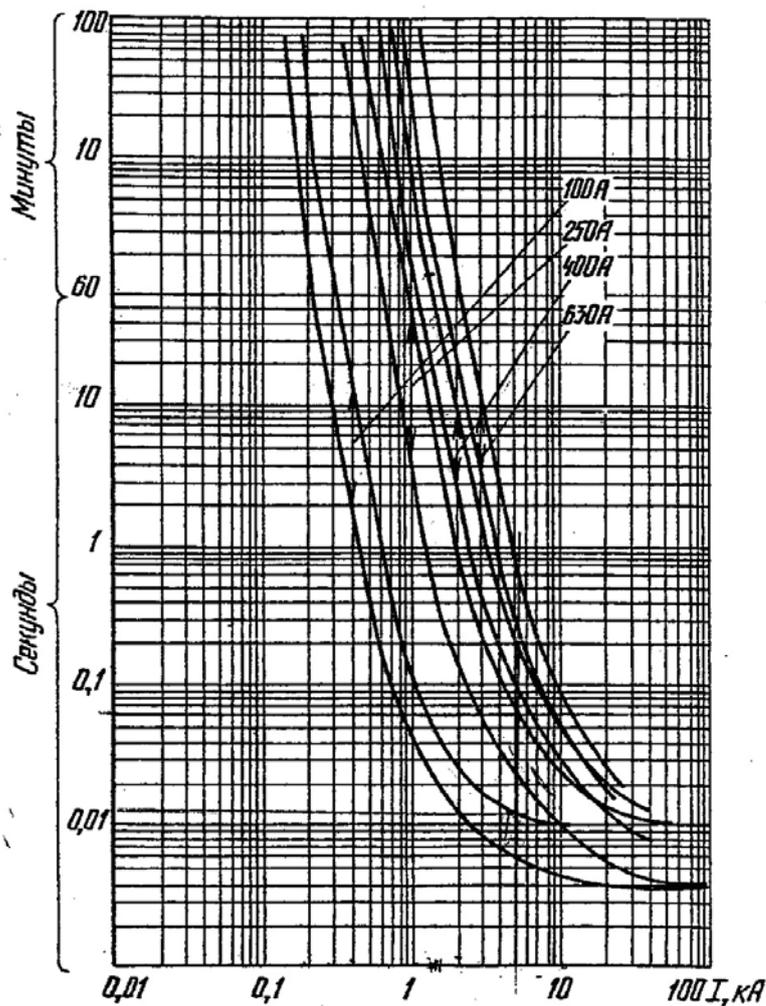


Рисунок 4.2 – Защитные времятоковые характеристики плавких предохранителей типа ПН2 [59]

Таким образом, при возникновении однофазного короткого замыкания в конце зоны защиты, построенной по требованиям 6-го издания ПУЭ, при коэффициенте чувствительности $K_{\text{ч}} = 3$ время перегорания плавкого предохранителя будет равно 90 с.

Согласно 7-му изданию ПУЭ время срабатывания защиты не должно превышать $t_{S,7} = 5$ с (все полученные переменные будем обозначать индексом – 7). По кривой $t_{SF} = f(L)$ (рисунок 4.1) определим новую длину зоны защиты плавкого

предохранителя $L_7 = 173$ м, а по кривой $I_{К.МИН}^{(1)} = f(L)$ – значение тока $I_{К.7}^{(1)} = 470$ А в конце зоны защиты, которое необходимо иметь для выполнения требований 7-го издания ПУЭ – обеспечения времени срабатывания предохранителя $t_{S.7}$ не более 5 с. Отметим, что в последнем случае коэффициент чувствительности защиты увеличивается до значения $K_{ч.7} = 4,7$.

Полученные характеристики защиты позволяют наглядно показать несоответствие требований ПУЭ 6-го издания по эффективности работы токовой защиты требованиям ПУЭ 7-го издания и, как следствие, несоответствие существующих методик выбора параметров и мест расстановки плавких предохранителей требованиям ПУЭ 7-го издания.

Зная зону защиты плавкого предохранителя F1 можно определить место установки секционирующего плавкого предохранителя F2, который должен защищать следующий участок воздушной линии. Место установки плавкого предохранителя F2 должно быть не далее расстояния L_7 , равного 173 м от начала воздушной линии. Поэтому, для установки секционирующего плавкого предохранителя F2 выбираем ближайшую опору в сторону трансформаторной подстанции.

Номинальный ток плавкого предохранителя F2, устанавливаемого в начале второго участка, выбирается из условия (4.2) отстройки от максимального рабочего тока $I_{P.МАКС.2}$ оставшегося участка линии и условия (4.3) отстройки от пикового тока.

Используя защитные времятоковые характеристики плавкого предохранителя F2 с его номинальным током $I_{F2.Н}$, построим новую зависимость времени срабатывания $t_{S.F2} = f(L)$ от длины защищаемой линии L . Причём отсчёт длины нового участка линии начинается с фактического места установки плавкого предохранителя F2. Порядок построения этой зависимости выполняется аналогично как и для плавкого предохранителя F1. Полученную зависимость $t_{S.F2} = f(L)$ наносим на ту же координатную плоскость (рисунок 4.3).

Согласно 7-му изданию ПУЭ для времени срабатывания защиты $t_{S.7} \leq 5$ с по кривой $t_{S.F2} = f(L)$ (рисунок 4.3) определим длину зоны защиты плавкого предо-

хранителя $L_{3.F2}$, а по кривой $I_K^{(1)} = f(L)$ – значение тока $I_{K2}^{(1)}$ в конце этой зоны защиты. В случае необходимости, определяется место установки следующего секционирующего плавкого предохранителя F3. Его место установки на опоре воздушной линии должно быть на расстоянии не более, чем $L_{3.F1} + L_{3.F2}$ (рисунок 4.3). Для установки секционирующего плавкого предохранителя F3 выбираем ближайшую опору в сторону трансформаторной подстанции. Далее все параметры плавкого предохранителя F3 определяются аналогично вышестоящим предохранителям F1 и F2.

Если в результате расчётов оказывается, что время срабатывания $t_{S.F3}$ плавкого предохранителя F3 в конце всей линии получается меньше требуемого по ПУЭ значения времени отключения повреждения, т.е.

$$t_{S.F3} \leq t_{S.7} = 5 \text{ с}, \quad (4.8)$$

то это будет говорить о том, что плавкий предохранитель F3 обеспечивает защиту оставшейся части линии и на этом расчёт следует остановить.

В результате получаем схему защиты, построенную путём секционирования на участки воздушной линии, в начале, каждого из которых устанавливаются плавкие предохранители. Каждый предохранитель обеспечивает 100 %-ю защиту своего участка.

Далее остается проверить условие обеспечения селективности смежных (вышестоящих F_{i-1} и нижестоящих F_i) предохранителей, т.е. выполнимость условия:

$$I_{F.Hi-1} / I_{F.Hi} \geq 1,6. \quad (4.9)$$

На рисунке 4.3 схематично показан результат выбора параметров аппаратов защиты воздушной линии, имеющей несколько ступеней секционирования, с указанием максимального рабочего тока в начале i -го участка линии $I_{P.MAKC.i}$, длины зоны защиты плавкого предохранителя, обеспечивающего защиту i -го участка линии $L_{3.i}$ и минимального тока однофазного короткого замыкания в конце i -го участка линии $I_{K.i}^{(1)}$.

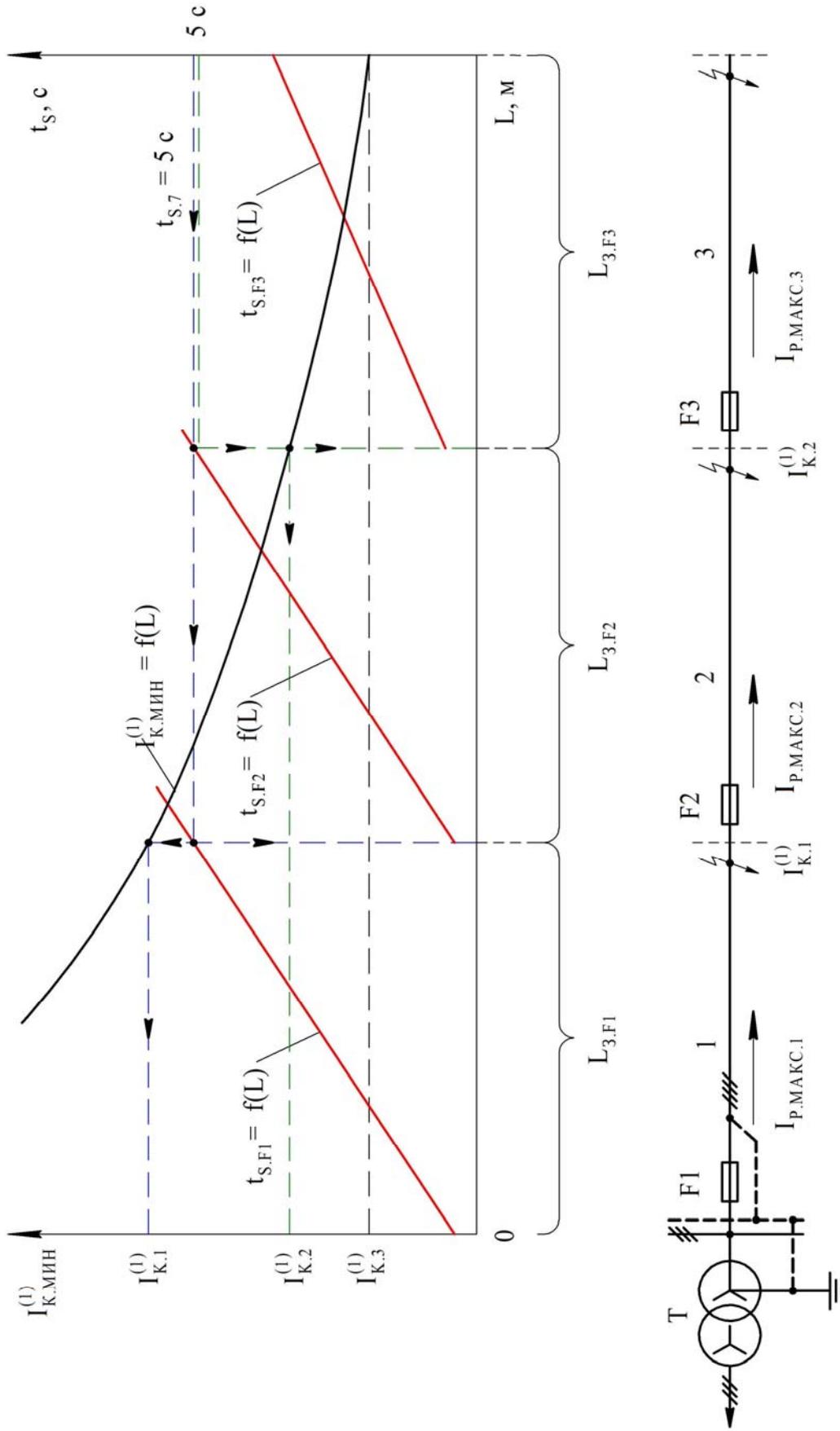


Рисунок 4.3 – Графическое представление результатов выбора параметров и мест расстановки плавких предохранителей

На рисунке 4.3 схематично показан результат выбора параметров аппаратов защиты воздушной линии, имеющей несколько ступеней секционирования, с указанием максимального рабочего тока в начале i -го участка линии $I_{P, \text{МАКС}, i}$, длины зоны защиты плавкого предохранителя, обеспечивающего защиту i -го участка линии $L_{3, i}$ и минимального тока однофазного короткого замыкания в конце i -го участка линии $I_{K, i}^{(1)}$.

Для того, чтобы кратко пояснить процесс расчёта защиты воздушной линии напряжением 380 В представим его в виде алгоритма, приведенного на рисунке 4.4.

Методика выбора параметров и мест расстановки автоматических выключателей аналогична выбору параметров плавких предохранителей.

Дополнительно нами были определены предельные длины зон защиты воздушной линии от ОКЗ плавкими предохранителями, в конце которых обеспечивается время срабатывания 5 с. Определение предельной длины зоны защиты воздушной линии, защищаемой плавкими предохранителями с разными номинальными токами, производилось исходя из следующих допущений:

1. Выбор параметров плавких предохранителей производился по условию защиты воздушной линии от однофазного короткого замыкания.
2. Нагрузка распределена равномерно по всей длине линии.
3. Устанавливаемые для защиты воздушной линии плавкие предохранители имеют номинальные токи, превышающие соответствующие максимальные рабочие токи защищаемых участков линии.

Рассмотрим схему электрической сети напряжением 380 В (рисунок 4.5), в которой от РУ-0,4 кВ трансформаторной подстанции напряжением 6–10/0,4 кВ отходят воздушные линии. В начале каждой из них установлены плавкие предохранители.

Расчеты проведём при изменении следующих параметров электрической сети:

1. Мощность трансформаторов, устанавливаемых в трансформаторной подстанции напряжением 6–10/0,4 кВ, последовательно будет составлять 100, 160, 250, 400 и 630 кВА со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем».

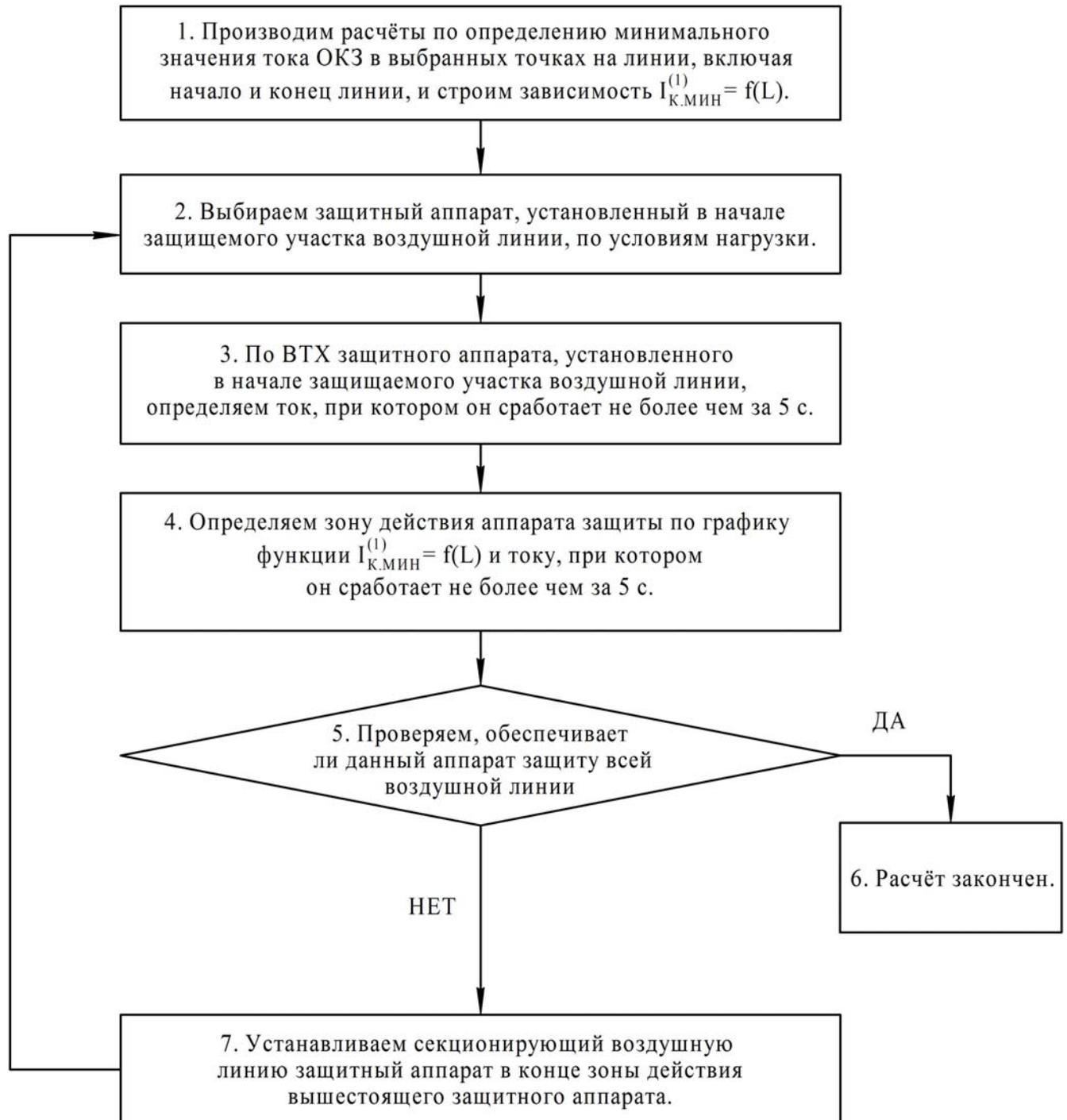


Рисунок 4.4 – Алгоритм выбора параметров защитных аппаратов, секционирующих линию электропередачи на участки

2. Воздушные линии выполнены проводами марки АС с сечением проводов $4 \times 25 \text{ мм}^2$, $4 \times 35 \text{ мм}^2$, $4 \times 50 \text{ мм}^2$, $4 \times 70 \text{ мм}^2$, $4 \times 95 \text{ мм}^2$.

3. В начале воздушной линии установлены плавкие предохранители типа ППН с номинальными токами плавких вставок 32, 40, 63, 100, 160 и 250 А. Других защитных аппаратов в линии нет.

Расчёт предельной длины зоны защиты воздушной линии осуществлялся аналогично определению зоны защиты плавкого предохранителя F1 (рисунок 4.1)

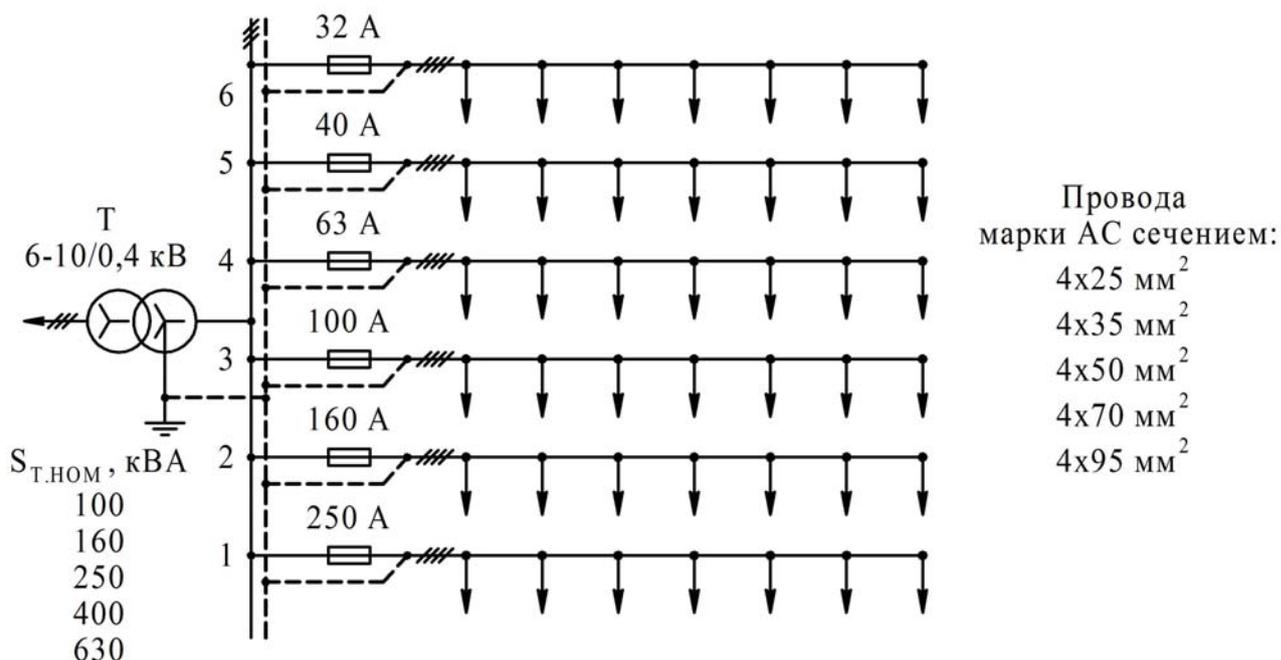


Рисунок 4.5 – Схема электрической сети напряжением 380 В

с воздушными линиями и равномерно распределённой нагрузкой по их длине

В таблице 4.1 представлены результаты расчёта предельной длины зоны защиты воздушной линии L_3 в зависимости от мощности силового трансформатора ($S_{Т.НОМ}$). Для каждой мощности трансформатора рассмотрены разные сечения проводов воздушной линии $F_{ПР}$ и разные номинальные токи $I_{Ф.Н}$ плавких предохранителей.

В качестве примера на рисунке 4.6 приведены графические зависимости предельных длин зон защиты воздушной линии с помощью плавких предохранителей с номинальным током плавкой вставки 100 А, устанавливаемых в начале линии, в функции от мощности трансформаторов.

Таблица 4.1 – Предельные длины зоны защиты L_3 , м, воздушной линии в зависимости от мощности трансформатора ТП $S_{Т.НОМ}$, кВА, сечения проводов воздушной линии $F_{ПР}$, мм² при защите ВЛ плавкими предохранителями с разными номинальными токами $I_{Ф.Н}$, А

$S_{Т.НОМ}$, кВА	Сечение провода $F_{ПР}$ воздушной линии марки АС, мм ²				
	25	35	50	70	95
Плавкая вставка $I_{Ф.Н} = 32$ А					
100	525	675	900	1075	–
160	550	725	950	–	–
250	555	730	975	–	–
400	575	735	1000	–	–
630	580	750	1010	–	–
Плавкая вставка $I_{Ф.Н} = 40$ А					
100	400	525	700	875	1025
160	425	575	750	950	–
250	435	590	775	980	–
400	440	600	790	1015	–
630	450	612,5	800	1025	–
Плавкая вставка $I_{Ф.Н} = 63$ А					
100	200	275	350	425	525
160	227,5	302,5	400	500	600
250	250	330	437,5	550	675
400	255	350	455	575	700
630	262,5	360	475	600	725
Плавкая вставка $I_{Ф.Н} = 100$ А					
100	50	60	75	100	125
160	75	115	150	187,5	225
250	95	135	180	237,5	277,5
400	112,5	150	200	262,5	312,5
630	125	160	212,5	275	337,5
Плавкая вставка $I_{Ф.Н} = 160$ А					
100	0	0	0	0	0
160	25	30	38	50	55
250	35	50	75	100	120
400	50	70	100	130	160
630	55	80	110	145	175
Плавкая вставка $I_{Ф.Н} = 250$ А					
100	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	20
400	20	28	37,5	50	60
630	22,5	37,5	52	65	77,5

В приложении Г приведены аналогичные зависимости для плавких вставок с номинальным токами 32, 40, 63, 100, 160 и 250 А (рисунки ПГ.1–ПГ.6).

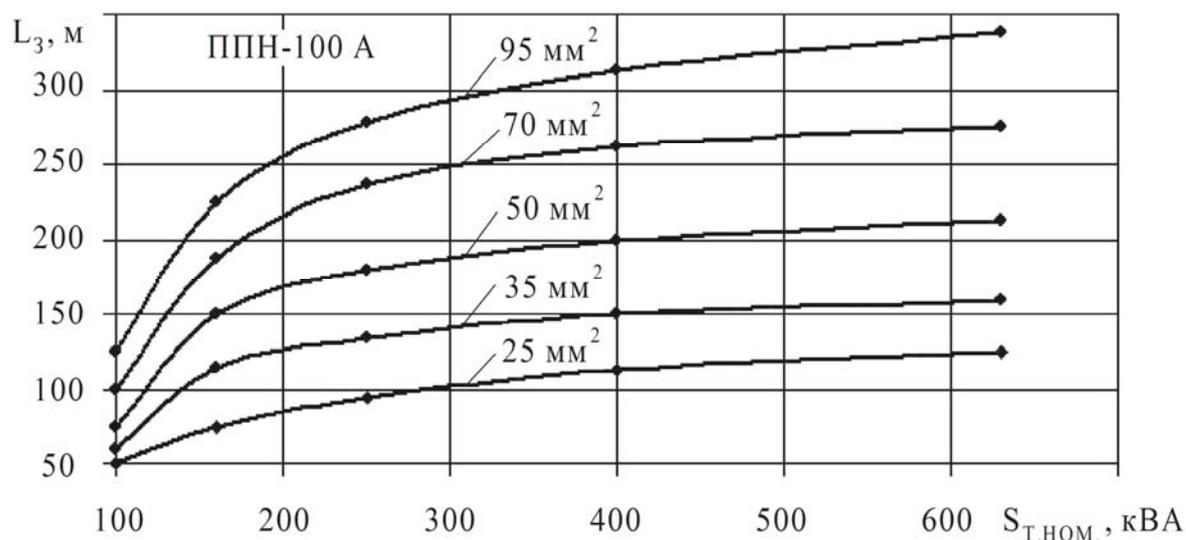


Рисунок 4.6 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-100 А, обеспечивающей

время срабатывания $t_{S,F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{T,НОМ})$ для разных сечений проводов

Дополнительно проведена оценка изменения зоны защиты плавкими предохранителями, установленными в начале отходящей ВЛ 380 В в зависимости от схемы соединения обмоток силового трансформатора. На рисунке 4.7 пунктирными линиями представлены зоны защиты для неизолированного провода марки АС-4х95, а сплошными для провода марки АС-4х35.

Анализ полученных характеристик показал, что:

1. Чем меньше номинальный ток плавкого предохранителя $I_{F,Н}$, тем больше предельная длина зоны защиты воздушной линии L_3 . Это связано с тем, что меньшие номинальные токи $I_{F,Н}$ при коэффициентах чувствительности $K_{\text{ч}}$ предохранителей, обеспечивающих их срабатывание за время $t_s \leq 5$ с и находящихся в пределах $K_{\text{ч}} = 4,5-6$, обуславливают соответственно меньшие допустимые минимальные токи однофазного короткого замыкания $I_{K,МИН}^{(1)}$.

2. При номинальном токе плавкого предохранителя типа ППН $I_{F,Н} = 32$ А предельная длина зоны защиты линии и, соответственно, длина самой воздушной линии находятся в пределах 500–1000 м в зависимости от сечения провода линии при всех принятых к рассмотрению значениях $S_{T,НОМ}$.

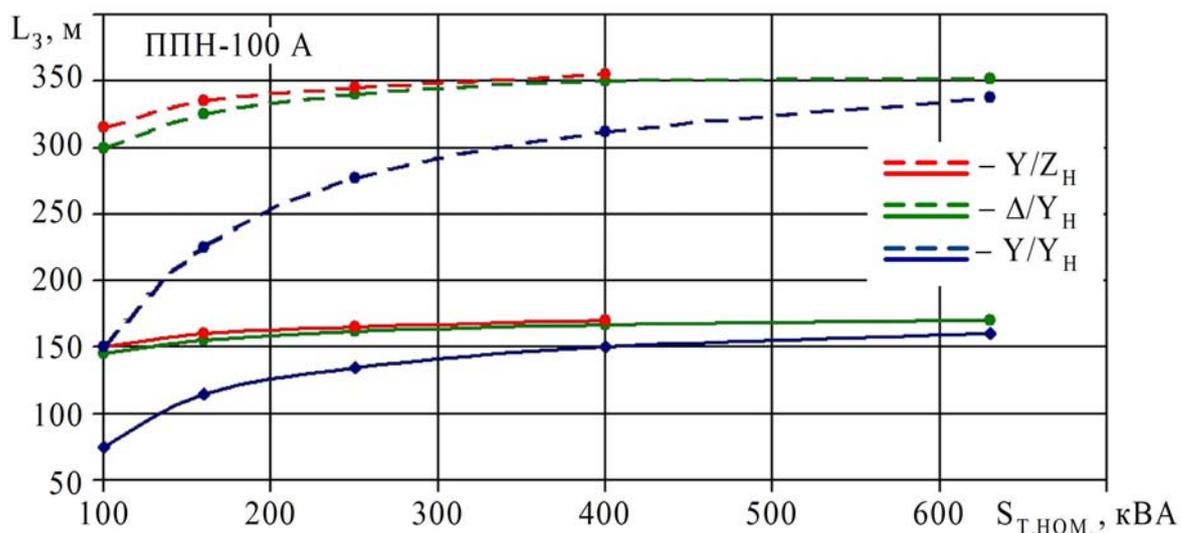


Рисунок 4.7 – Зависимости изменения предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-100 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S.F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{T.НОМ})$ для разных сечений проводов и схем соединения обмоток силового трансформатора

3. При номинальном токе плавкого предохранителя типа ППН $I_{F.H} = 250$ А предельная длина зоны защиты линии и, соответственно, длина самой воздушной линии может составлять только десятки метров, а при $I_{F.H} = 160$ А – не более 180 м. Сегодня при широком использовании плавких предохранителей с номинальным током $I_{F.H} = 250$ А защита воздушных линий практически не обеспечивается.

4. Для предохранителей с номинальным током 160 и 250 А характеристики рассмотрены только для трансформаторов с номинальной мощностью, начиная соответственно со 160 и 250 кВА. Это объясняется тем, что при меньшей мощности трансформаторов защиты с такими предохранителями не выполняются.

5. Схема соединения обмоток силового трансформатора «треугольник-звезда с нулем» и «звезда-зигзаг с нулем» оказывает значительное влияние на величину зоны защиты, построенной с использованием плавких предохранителей, при мощности трансформатора до 400 кВА.

6. Учитывая значительную протяженность отходящих линий в распределительных сетях напряжением 380 В, выполненных неизолированными проводами, можно говорить о том, что применение силовых трансформаторов со схемами со-

единения обмоток «треугольник-звезда с нулем» и «звезда-зигзаг с нулем» так же как и со схемой соединения «звезда-звезда с нулем» не всегда обеспечивают защиту рассматриваемых сетей от однофазных коротких замыканий в соответствии с требованиями ПУЭ.

В работе также определены зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии в зависимости от сечения проводов. В таблице 4.2 представлены результаты расчёта предельной длины зоны, а на рисунке 4.8, в качестве примера, приведена подобная зависимость для плавкой вставки с номинальным током 100 А. В приложении Д на рисунках Д.1–Д.6 приведены графические зависимости для плавких вставок других номинальных токов.

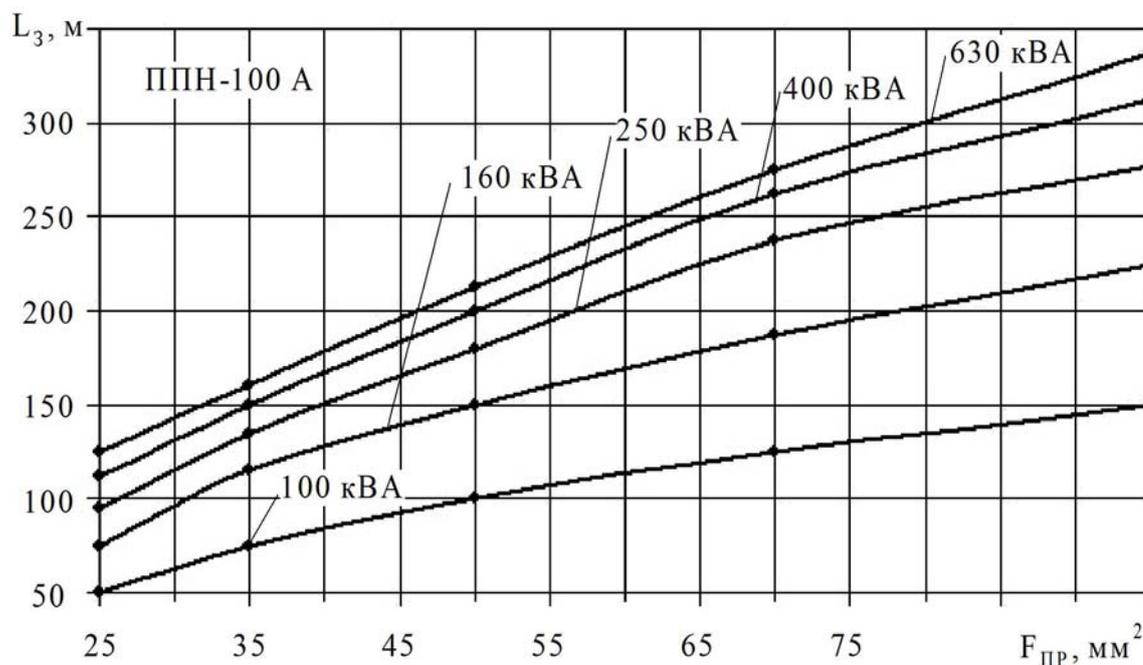


Рисунок 4.8 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-100 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{пр})$ для разной мощности силовых трансформаторов

Из анализа полученных зависимостей видно, что на малонагруженных линиях мощность силовых трансформаторов мало влияет на предельную длину зоны защиты предохранителей – для длинных линий в сопротивлении цепи току однофазного короткого замыкания увеличивается доля сопротивления линии электропередачи по сравнению с сопротивлением силового трансформатора.

Таблица 4.2 – Предельные длины зоны защиты L_3 , м

Сечение проводов воздушной линии $F_{ГПР}$ марки АС, мм ²	Номинальная мощность трансформатора $S_{Т.НОМ}$, кВА				
	100	160	250	400	630
Плавкая вставка $I_{F.H} = 32$ А					
4x25	525	550	565	575	580
4x35	675	720	730	740	750
4x50	900	950	975	1000	1010
4x70	1075	–	–	–	–
Плавкая вставка $I_{F.H} = 40$ А					
4x25	400	425	435	440	450
4x35	525	575	590	600	612,5
4x50	700	750	775	790	800
4x70	875	950	985	1015	1025
4x95	1025				
Плавкая вставка $I_{F.H} = 63$ А					
4x25	200	227,5	250	255	262,5
4x35	275	302,5	330	350	360
4x50	350	400	437,5	455	475
4x70	425	500	550	575	600
4x95	525	600	675	700	725
Плавкая вставка $I_{F.H} = 100$ А					
4x25	50	75	95	112,5	125
4x35	60	115	135	150	160
4x50	75	150	180	200	212,5
4x70	100	187,5	237,5	262,5	275
4x95	125	225	277,5	312,5	337,5
Плавкая вставка $I_{F.H} = 160$ А					
4x25	–	25,00	35,00	50,00	55,00
4x35	–	30,00	50,00	70,00	80,00
4x50	–	38,00	75,00	100,00	110,00
4x70	–	50,00	100,00	130,00	145,00
4x95	–	55,00	120,00	160,00	175,00
Плавкая вставка $I_{F.H} = 250$ А					
4x25	–	–	0	20	22,5
4x35	–	–	0	28	37,5
4x50	–	–	0	37,5	52
4x70	–	–	0	50	65
4x95	–	–	20	60	77,5

Предположим, что ВЛ 380 В защищаются автоматическими выключателями. Защитные времятоковые характеристики отечественных автоматических выключателей имеют несколько худшие параметры по сравнению с аналогичными характеристиками плавких предохранителей. Поэтому качество защиты воздушных линий от однофазного короткого замыкания они не улучшат.

Для сокращения времени и удобства проектирования токовых защит, построенных на плавких предохранителях и автоматических выключателях, предлагается определить места их расстановки по длине воздушной линии.

Рассмотрим электрическую сеть напряжением 380 В, воздушные линии которой для защиты от однофазного короткого замыкания выполнены секционированными, причём в начале каждого секционированного отрезка установлены плавкие предохранители (рисунок 4.9). Соотношение номинальных токов смежных предохранителей принято равным 1,6 по условию обеспечения селективности их работы.

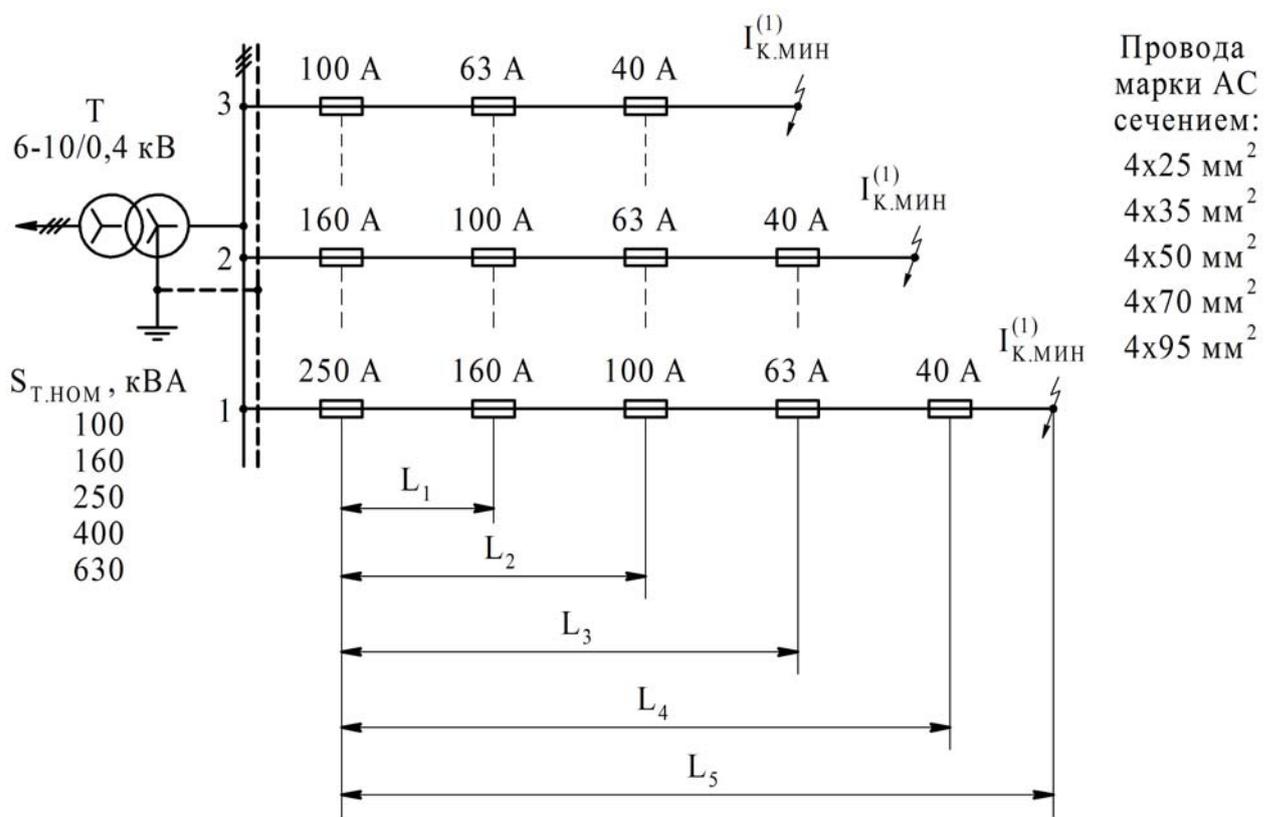


Рисунок 4.9 – Схема электрической сети напряжением 380 В, воздушные линии которой секционируются плавкими предохранителями

Рассчитаем предельные длины зон защиты секционированных участков воздушной линии. Для определения предельной длины зоны защиты приняты те же исходные допущения, что и при построении зависимости, представленной на рисунке 4.8.

Для каждого сечения провода рассмотрены три варианта секционирования воздушной линии:

1. При установке в начале линии плавкого предохранителя с номинальным током $I_{F.H} = 100$ А линия может быть разделена на три секции (участка). В начале 2 и 3-го участков устанавливаются предохранители с номинальными токами соответственно 63 и 40 А.

2. При установке в начале линии плавкого предохранителя с номинальным током $I_{F.H} = 160$ А линия может быть разделена на четыре участка. В начале 2, 3 и 4-го участков устанавливаются предохранители с номинальными токами соответственно 100, 63 и 40 А.

3. При установке в начале линии плавкого предохранителя с номинальным током $I_{F.H} = 250$ А линия может быть разделена на пять участков. В начале 2, 3, 4 и 5-го участков устанавливаются предохранители с номинальными токами соответственно 160, 100, 63 и 40 А.

Расчёты произведены при изменении мощности силового трансформатора, сечения проводов воздушной линии и номинального тока плавких предохранителей. Результаты расчётов сведены в таблицах Е.1–Е.6 (приложение Е), в которых представлены следующие расчётные данные:

$I_{K.MIN}^{(1)}$ – минимальный ток однофазного короткого замыкания в конце секционированного участка.

$K_{Ч.MIN}$ – коэффициент чувствительности плавкого предохранителя, обеспечивающий его срабатывание при токе $I_{K.MIN}^{(1)}$ за время не более чем за 5 с.

L_i – расстояние от ТП до конца i -й зоны защиты – см. рисунок 4.8.

$\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$ – длина секционированной зоны защиты воздушной линии.

В качестве примера, на рисунках 4.10 и 4.11 показаны зоны защиты секционирующих предохранителей электрических сетей, питающихся от трансформатора мощностью соответственно 630 и 160 кВА (два из четырнадцати вариантов).

На рисунках 4.10 и 4.11 показаны зоны защиты воздушной линии, длина каждой из которых определяется соотношением $\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$. С уменьшением номинального тока плавких предохранителей увеличиваются длина их зоны защиты.

Из рассмотрения рисунков 4.10 и 4.11 можно сделать следующие выводы:

1. Введение секционирования принципиально позволяет защитить всю длину воздушной линии. Но при этом нужно чётко согласовать выбор параметров защитных аппаратов с нагрузочными характеристиками защищаемой линии – защитные аппараты не должны ограничивать передаваемую по линии нагрузку.
2. Плавкие предохранители с большими номинальными токами имеют малые зоны защиты воздушной линии.

Для проверки корректности и эффективности разработанной методики выбора параметров плавких предохранителей и автоматических выключателей необходимо провести натурные испытания.

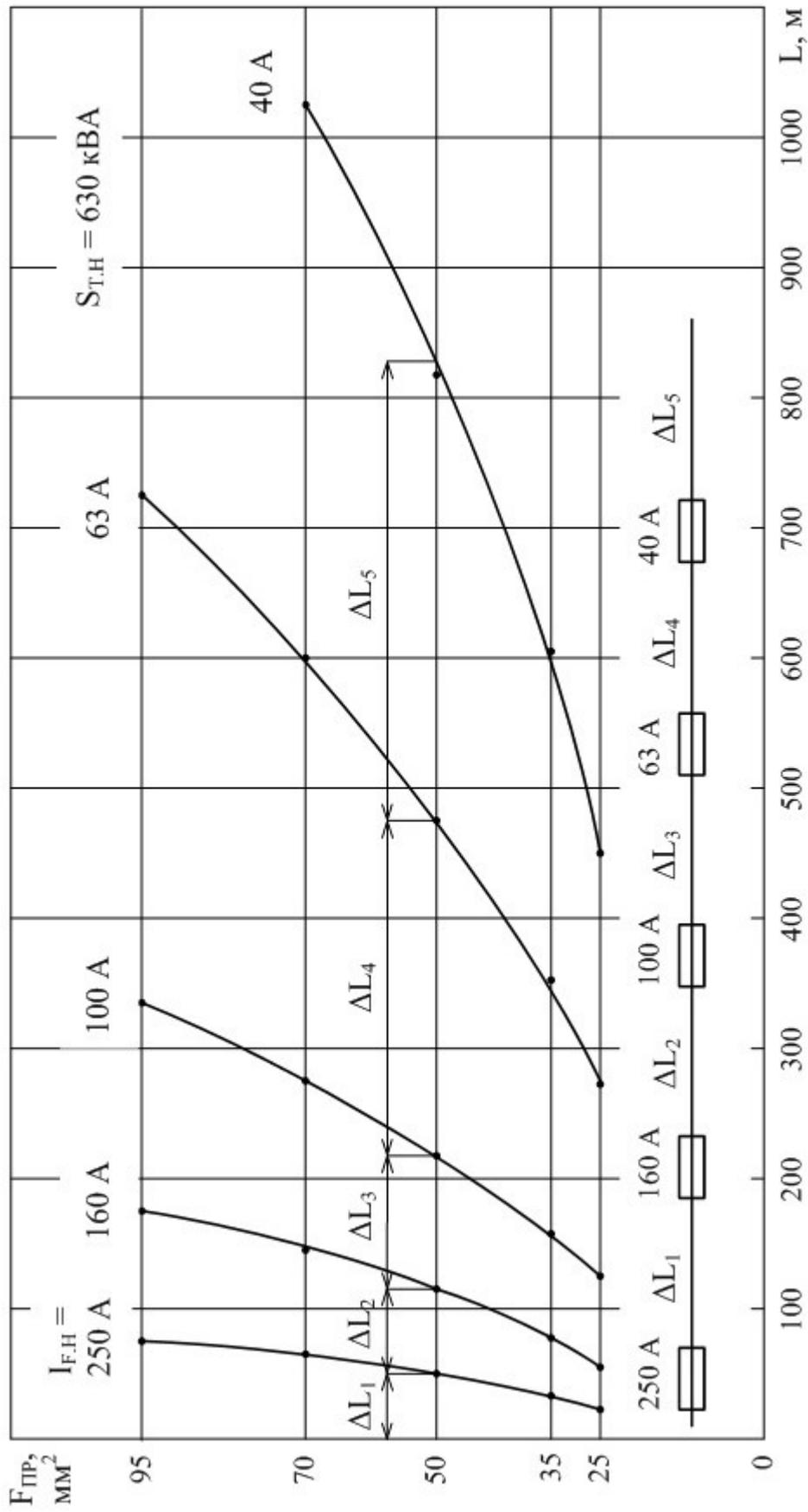


Рисунок 4.10 – Зоны защиты секционирующих предохранителей электрической сети, питающейся от трансформатора мощностью 630 кВА

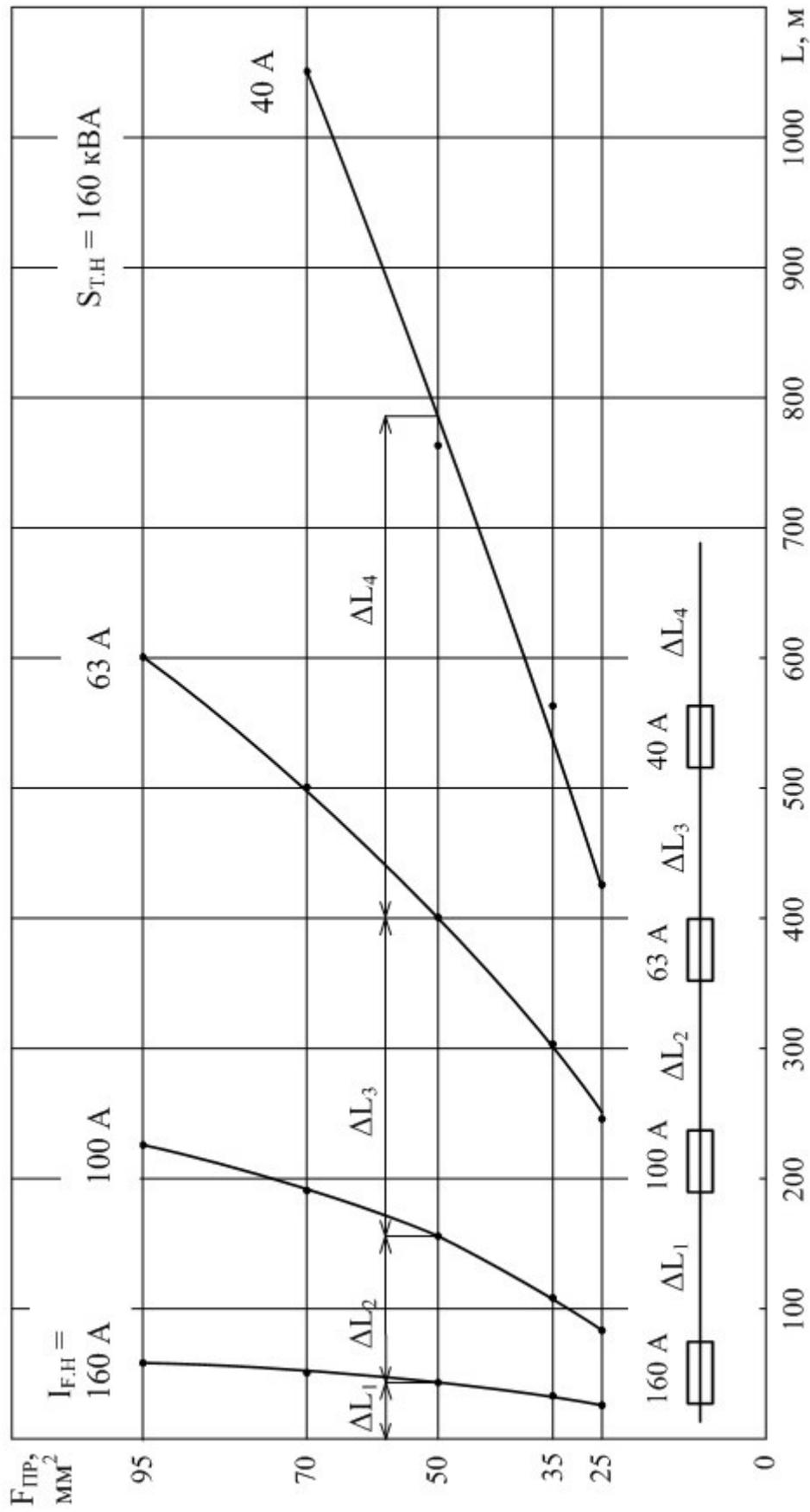


Рисунок 4.11 – Зоны защиты секционирующих предохранителей электрической сети, питающейся от трансформатора мощностью 160 кВА

4.2 Экспериментальная проверка разработанной методики расстановки токовых защит воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий

Натурные испытания защиты воздушной линии напряжением 380 В, рассчитанной по разработанной методике, были проведены в опытной электрической, разработанной нами, и расположенной на учебном полигоне филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго».

Расчет параметров плавких предохранителей проводился по описанному ранее алгоритму, в результате которого была рассчитана графическим методом защита опытной электрической сети (см. рисунок 4.12).

На рисунке 4.11 показаны токи ОКЗ, полученные в результате:

- аналитических расчётов $I_{к.м}^{(1)} = f(L)$;
- прямых замеров на опорах 7, 10, 15, 19 (на графике показаны соответственно точки a, b, c, d);

Отметим, что расчетные величины тока однофазного металлического короткого замыкания на сборных шинах РУ-0,4 кВ ТП и в конце воздушной линии составляют соответственно 1037 А и 228 А.

Испытания разработанной защиты от однофазных коротких замыканий воздушной линии напряжением 380 В произведены путем создания искусственного короткого замыкания между фазным и нулевым проводами последовательно на опорах 19, 15 и 7. При этом все аппараты защиты работали с холодного состояния. Результаты испытаний сведены в таблицу 4.3.

Проведенные испытания разработанной защиты от однофазных коротких замыканий воздушной линии напряжением 380 В позволяют сделать следующий вывод:

Построение защиты воздушной линии напряжением 380 В путем её секционирования на участки позволяет обеспечить срабатывания средств защитных аппаратов в требуемое ПУЭ 7-го издания – 5 с.

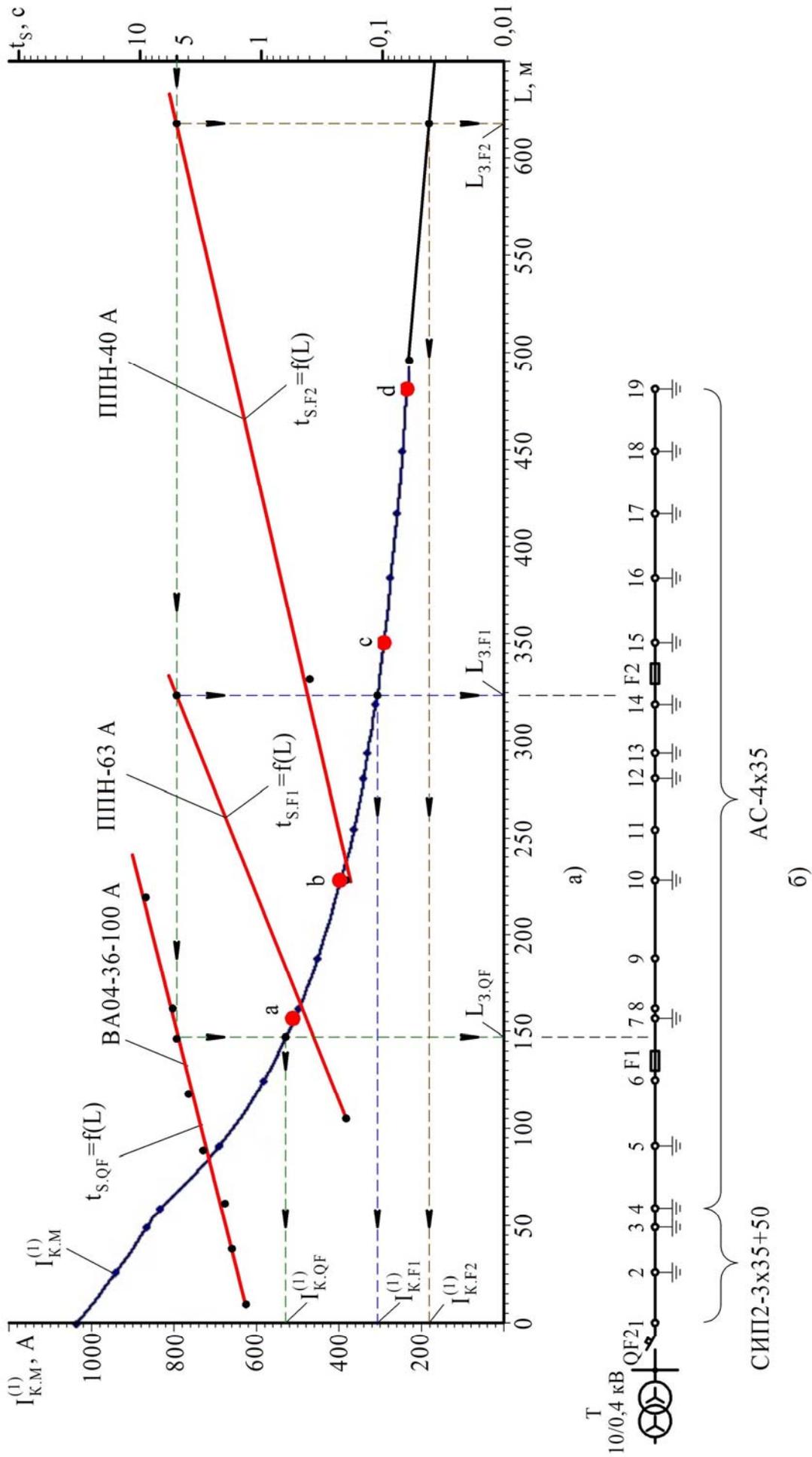


Рисунок 4.12 – Расчёт и расстановка аппаратов защиты в опытной электрической сети

Таблица 4.3 – Результаты испытания защиты воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В

№ опыта	Защитный аппарат, $I_{НОМ}$, А	Место ОКЗ, номер опоры	Замеренный среднеквадратичный ток $I_{С.К.}$, А	Кратность $I_{С.К.}/ I_{НОМ}$	Время срабатывания защиты, с
1	F2, ПН-2, 40 А	19	230,8	5,77	0,54
2			228,3	5,71	0,28
3			232,5	5,81	2,1
4	F1, ПН-2, 63 А	15	288,4	4,57	3,2
5			288,2	4,57	3,06
6			288,1	4,57	2,42
7	QF, ВА04-36, 100 А	7	511,7	5,11	4,9
8			509,9	5,09	4,34
9			509,2	5,09	4,1

Результаты испытаний подтверждены соответствующим актом испытания (см. Приложение Ж).

4.3 Внедрение средств защиты в действующих электрических сетях

На основе разработанной методики была выполнена защита действующей электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиям села Селезян. На рисунке 4.13 приведён план размещения воздушных линий напряжением 380 В села Селезян, которые обслуживаются Селезянским мастерским участком Еткульского РЭС ПО «Центральные электрические сети».

Село Селезян питается от трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ, в которой установлен силовой трансформатор типа ТМ-160 кВА со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем».

Общая характеристика электрической сети села Селезян представлена в таблице 4.4.

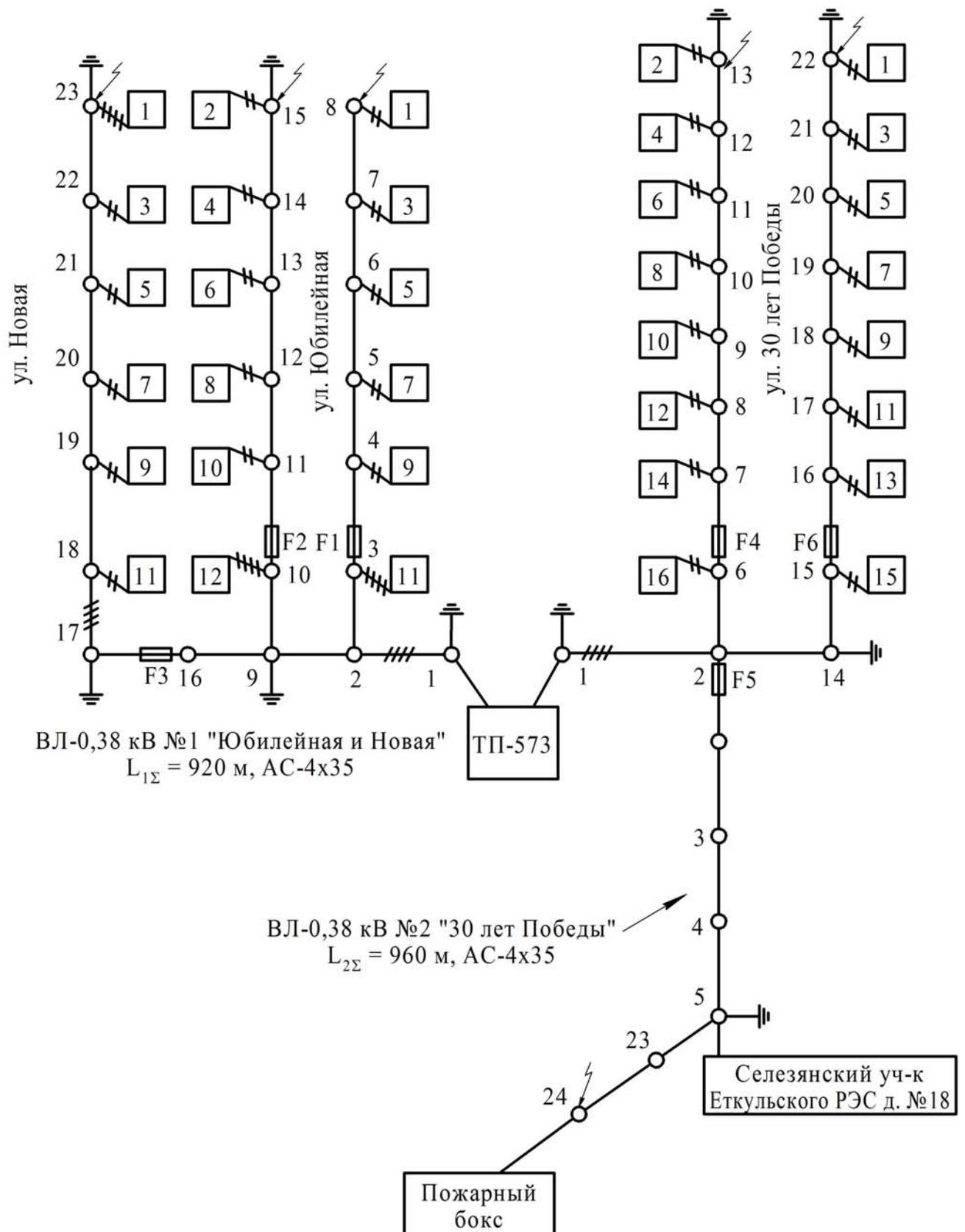


Рисунок 4.13 – План размещения ВЛ 380 В, питающейся от ТП-573

Таблица 4.4 – Общая характеристика электрической сети напряжением 380 В села Селезян

Трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ						
Тип трансформатора	Номинальная мощность трансформатора, кВА	Схема соединения обмоток	Число отходящих групп, шт.	Вводной защитный аппарат на напряжение 0,4 кВ	Тип защитного аппарата, установленного на начале воздушной линии	
					№ 1	№ 2
ТМ	160	Y/Y _H	2	ПН2-250	ВА04-36-100	ВА04-36-100
Воздушные линии напряжением 380 В						
Воздушная линия № 1						
Общая протяженность, м	Марка и сечение проводов	Длина участка «1-2-8», м	Длина участка «1-9-15», м	Длина участка «1-9-16-23», м		
920	АС-4x35 мм ²	320	360	440		
Воздушная линия № 2						
Общая протяженность, м	Марка и сечение проводов	Длина участка «1-2-6-13», м	Длина участка «1-2-14-22», м	Длина участка «1-2-3-24», м		
960	АС-4x35 мм ²	384	422,4	307,2		

Расчет защиты воздушных линий напряжением 380 В села Селезян был произведен согласно разработанной методике.

Для определения изменения величины тока однофазного короткого замыкания с учетом эффекта «теплового спада» и сопротивления дуги в месте замыкания были использованы расчетные типовые кривые $I_{к.мин}^{(1)} = f(L)$ (см. Приложение А и Б). В таблице 4.5 приведены значения токов ОКЗ в конце рассматриваемых участков ВЛ 380 В.

В РУ-0,4 кВ ТП-573 по данным замеров электрических нагрузок воздушных линий в зимнее время для коммутации и защиты отходящих групп № 1 и № 2 установлены автоматические выключатели типа ВА04-36 с номинальным током 100 А.

При выборе плавких предохранителей по максимальному рабочему току было принято допущение, что нагрузка на участках ВЛ №1 (см. рисунок 4.14) 2–8, 9–15 и 16–23 распределяется равномерно и равняется $I_{P, \text{МАКС}} = 100/3 = 33,3 \text{ А}$. Аналогично принято допущение и для участков ВЛ №2.

Таблица 4.5 – Минимальные значение токов ОКЗ на последней опоре участков ВЛ 380 В

Воздушная линия № 1		
Участок «1-2-8», на опоре 8	Участок «1-9-15», на опоре 15	Участок «1-9-16-23», на опоре 23
305 А	276 А	235 А
Воздушная линия № 2		
Участок «1-2-6-13», на опоре 13	Участок «1-2-14-22», на опоре 22	Участок «1-2-3-24», на опоре 24
263 А	240 А	315 А

После того, как была определена зона защиты автоматических выключателей QF1 и QF2, равная $L_{3, \text{QF}} = 130 \text{ м}$, уточнилась расстановка секционирующих плавких предохранителей на воздушных линиях №1 и №2. Исходя из допущений по распределению электрической нагрузки между характерными участками воздушных линий №1 и №2 и мест установки секционирующих плавких предохранителей были приняты к установке плавкие предохранители с номинальным током плавкой вставки 40 А (рисунок 4.14).

На воздушной линии № 1 секционирующие предохранители F1, F2 и F3 необходимо установить на опорах № 3, 9 и 10, находящихся в зоне защиты автоматического выключателя QF1. Предохранитель F1, установленный на опоре № 3, будет защищать участок линии с опорами 3–8. Установка двух блоков ПВР-0,38 с предохранителями на одной опоре № 9 затруднительна. Поэтому на опоре № 9 установим только предохранитель F3, который защитит участок линии с опорами 9–23. Предохранитель F2 перенесём на опору № 10 и он защитит участок линии с опорами 10–15.

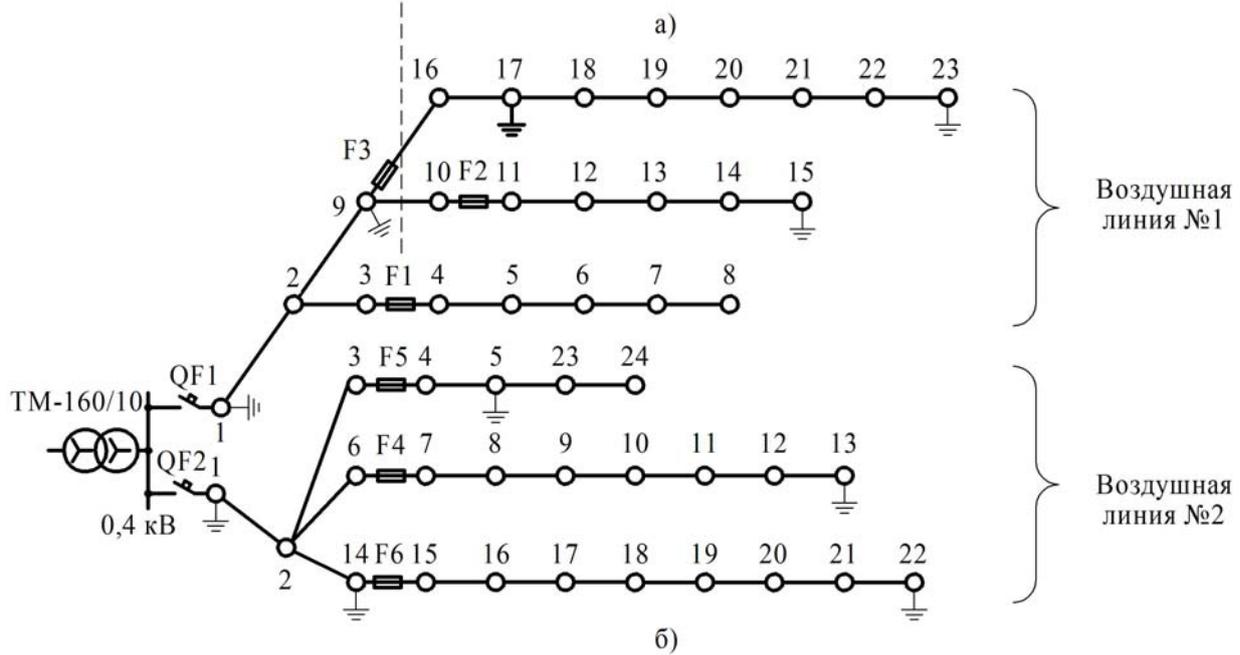
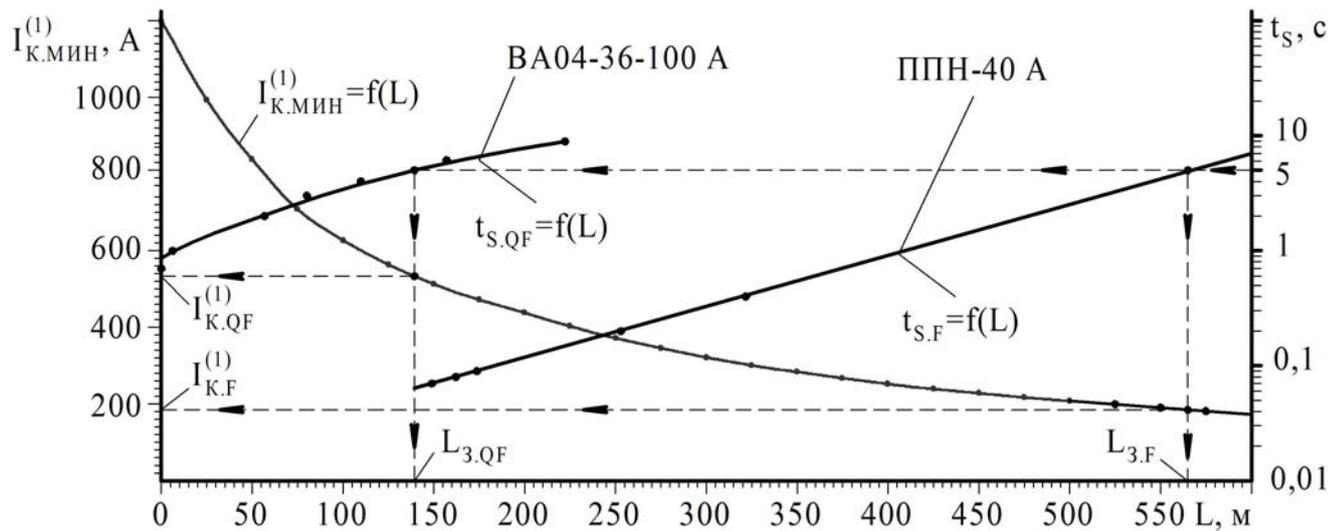


Рисунок 4.14 – Выбор параметров и расстановка аппаратов защиты воздушных линий в селе Селезян: а) графический расчет защиты от ОКЗ; б) места установки плавких предохранителей в электрической сети

На воздушной линии № 2 секционирующие предохранители F5, F4 и F6 можно установить на опорах № 3, 6 и 14, при этом они будут защищать соответственно участки линии с опорами 3–24, 6–13 и 14–22. Места установки этих предохранителей попадают в зону защиты автоматического выключателя QF2, установленного в начале линии. Вся воздушная линия № 2 находится в зоне защиты автоматического выключателя QF2 и предохранителей F4–F6 с временем отключения однофазного короткого замыкания не более чем $t_s = 5$ с.

Учитывая, что отношение между номинальными токами автоматических выключателей и плавких предохранителей составляет

$$I_{QF.H} / I_{F.H} = 100 \text{ A} / 40 \text{ A} = 2,5,$$

можно говорить об обеспечении селективности между этими аппаратами.

Отметим, что коэффициент чувствительности теплового расцепителя автоматических выключателей в конце зоны защиты равен 5,4, а для плавких предохранителей F1–F6 – не менее 6.

Внедрение защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий села Селезян, обеспечило время срабатывания не более 5 с.

Факт использования разработанной методики расчета защиты при реконструкции электрической сети с. Селезян подтверждается актом использования (Приложение И). Внедрение в проектно-эксплуатационную деятельность филиала «МРСК Урала»-«Челябэнерго» подтверждается актом внедрения (см. Приложение К).

4.4 Оценка технико-экономической эффективности внедрения

В работах [18, 21, 24] нами было показано, что обеспечение защиты от однофазных коротких замыканий в протяженных воздушных линиях 380 В может быть достигнуто секционированием этих линий.

Оценим изменение уровня электробезопасности при возникновении однофазного короткого замыкания в конце протяженной воздушной линии 380 В до и после секционирования.

На рисунке 4.15 приведена схема такой линии, а также потенциальная диаграмма нулевого провода в предположении, что сопротивления фазного и нулевого проводов равны между собой (сопротивление нулевого провода включает как собственное, так и сопротивления повторных заземлителей и заземления нейтрали).

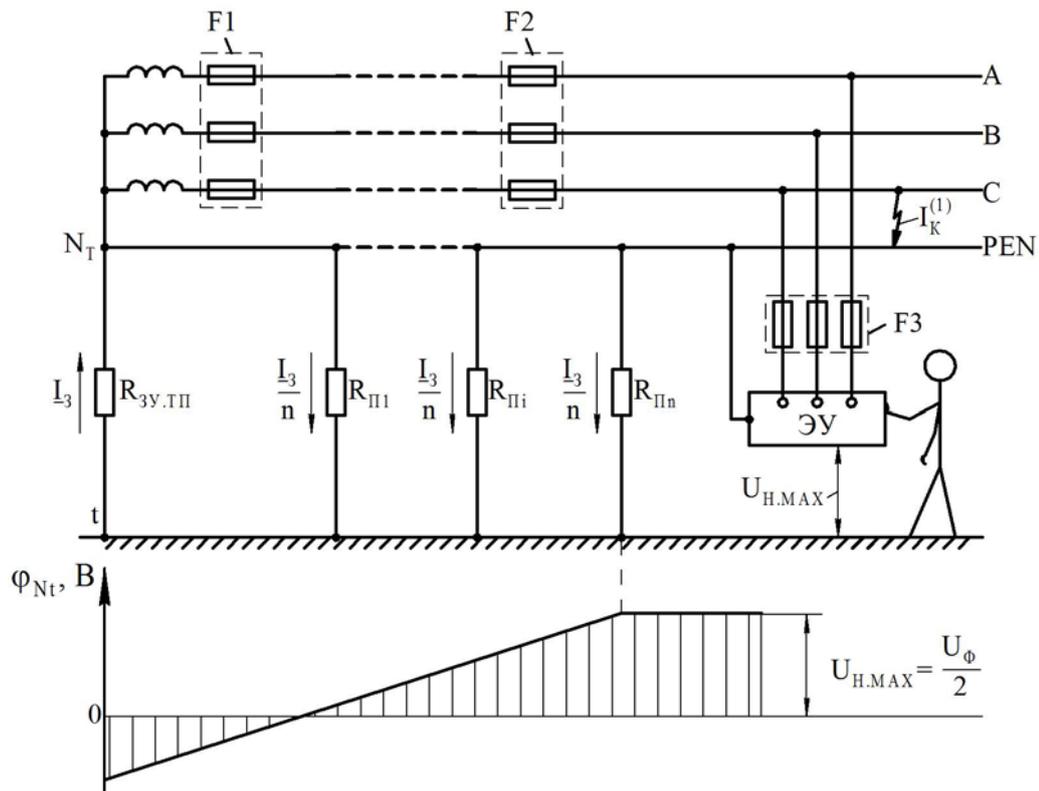


Рисунок 4.15 – Схема линии электропередачи 380 В и потенциальная диаграмма.

Здесь обозначено: F1– плавкие предохранители, установленные в голове линии;

F2– предохранители, установленные в месте секционирования;

F3 – предохранители, защищающие электроустановки ЭУ;

$R_{3y.tn}$, $R_{пi}$ – $R_{пn}$ – сопротивления заземления нейтрали трансформаторной подстанции и повторных заземлителей; I_3/n – ток, протекающий по повторному заземлителю; $U_{н.маx}$ – максимальное значение напряжения нулевого провода по отношению к земле в режиме однофазного короткого замыкания

Оценке уровня риска при эксплуатации электроустановок посвящено достаточно большое количество работ [42–44, 77, 79, 108, 109 и др.].

В нашей работе изменение уровня электробезопасности оценим с помощью логико-вероятностного метода, математическая сущность которого подробно изложена в [99] и заключается в использовании алгебры логики для аналитической записи условий надежности структурно сложных схем. Применение же этого метода к моделированию электроопасных ситуации или, иначе говоря, оценке уровня электробезопасности в электроустановках до 1000 В, показано в работах Суворова И.Ф. [117, 118].

На рисунке 4.16 представлены логико-вероятностные модели возникновения электроопасной ситуации при однофазном коротком замыкании в линии без секционирования (рисунок 4.16,а) и при наличии секционирования (см. рисунок 4.16,б). А в таблице 4.6 дано описание событий, образующих эти модели.

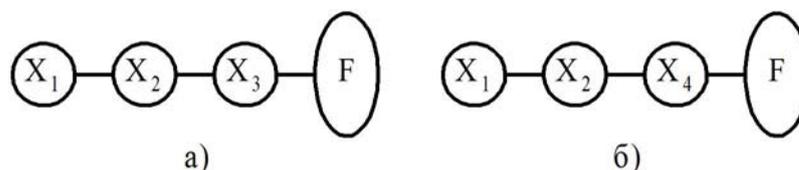


Рисунок 4.15 – Логико-вероятностные модели возникновения электроопасной ситуации при однофазном коротком замыкании в воздушной линии 0,4 кВ

Таблица 4.6 – Элементы структурной схемы возникновения электроопасной ситуации

Обозначении события	Содержание события
X_1	Прикосновение человека к корпусу электроустановки или связанными с ним металлическими конструкциям
X_2	Возникновение замыкания между фазным и нулевым проводами
X_3	Отказ в работе предохранителя, установленного в начале линии
X_4	Отказ в работе секционирующего предохранителя
F	Возникновение электроопасной ситуации

Для количественной оценки повышения уровня электробезопасности при установке секционирующих предохранителей необходимо найти вероятности возникновения событий X_1 – X_4 . Учитывая, что события X_1 и X_2 приведены в обеих логико-вероятностных моделях вероятности возникновения этих событий будут одинаковыми и могут быть приняты равными единице. Вероятность наступления события F при последовательном соединении событий (логическая операция «И») определяется по теореме умножения вероятностей независимых событий, а именно:

– для воздушной линии без секционирования плавкими предохранителями

$$P(F) = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3) \quad (4.10)$$

– для воздушной линии с секционирования плавкими предохранителями

$$P(F) = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_4) \quad (4.11)$$

Следовательно, повышение уровня электробезопасности определится отношением вероятностей событий X_3 и X_4 .

$$n = \frac{P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3)}{P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_4)} = \frac{P(X_3)}{P(X_4)} \quad (4.12)$$

В [21] нами было показано, что в реальных электрических сетях напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью, образованных воздушными линиями, требования Правил устройств электроустановок [п. 1.7.79, 93] по обеспечению времени отключения не более 5 с выполняются при возникновении однофазного короткого замыкания на расстояниях не более 100–300 м (в зависимости от схемы соединения обмоток силового трансформатора и его мощности, а также марки и сечения провода воздушной линии). Следовательно, при возникновении однофазного короткого замыкания на расстояниях более указанного, отключение произойдет либо за время более 5 с, либо может быть выполнено вручную. С учётом изложенного вероятность события X_3 может быть принята равной 1.

Вероятность события X_4 определяется надёжностью предохранителей, установленных в месте секционирования.

Анализ технической литературы показал, что применительно к предохранителям, выпускаемым в нашей стране, этот показатель ни где не приводится. Имеются данные по предохранителям на напряжение свыше 1000 В [142] (интенсивность отказов не более $\lambda = 0,02$ в год). При этом предположим, что интенсивность отказов плавких предохранителей в течении всей эксплуатации постоянна.

Тогда вероятность события X_4 можно рассчитать по выражению [61, 133]

$$P(X_4) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (4.10)$$

где t – период эксплуатации плавкого предохранителя, лет.

Для оценки повышения уровня электробезопасности при секционировании ВЛ 380 В плавкими предохранителями, определим среднее значение вероятности $Q_{\text{СР}}$ отказа плавкой вставки за период её эксплуатации $T_{\text{Э}} = 30$ лет.

Для определения среднего значения вероятности $P_{\text{СР}}$ отказа плавкой вставки за период её эксплуатации проинтегрируем выражение 4.10:

$$P_{\text{СР}} = \int_0^{T_{\text{Э}}} P(t) \cdot dt = \frac{T_{\text{Э}} + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda \cdot T_{\text{Э}}} - 1)}{T_{\text{Э}}} = 1 + \frac{e^{-\lambda \cdot T_{\text{Э}}} - 1}{\lambda \cdot T_{\text{Э}}}. \quad (4.11)$$

Тогда среднее значение вероятности отказа плавкой вставки за период её эксплуатации примет значение 0,248.

С учетом выше изложенного повышение уровня электробезопасности будет равно:

$$n = \frac{1}{P_{\text{СР}}} = \frac{1}{0,248} = 4,03. \quad (4.12)$$

Таким образом, внедрение в практику эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В установки секционирующих предохранителей, обеспечивающих требования ПУЭ 7-го издания по времени срабатывания токовых защит, позволит повысить уровень электробезопасности не менее, чем в 4 раза. Кроме того, это одновременно существенно снизит возможное число возгораний, вызванных однофазными короткими замыканиями на воздушных линиях напряжением 380 В.

На ряду с повышением уровней электробезопасности и пожаробезопасности внедрение разработок, приведенных в диссертации, обеспечит определенный социально-экономический эффект.

4.5. Выводы

1. Разработана методика выбора параметров и расстановки средств токовых защит по воздушной линии напряжением 380 В, применение которой на стадии проектирования и при эксплуатации обеспечивает время их срабатывания не бо-

лее 5 с.

2. Построены зависимости предельных зон защиты плавкими предохранителями типа ППН от мощности силового трансформатора и сечения проводов ВЛ 380 В.

3. Показано несоответствие требований ПУЭ 6-го издания по эффективности работы токовой защиты требованиям ПУЭ 7-го издания и, как следствие, несоответствие существующих методик выбора параметров и мест расстановки плавких предохранителей требованиям ПУЭ 7-го издания.

4. Проведена экспериментальная проверка разработанной методики в опытной электрической сети напряжением 380 В, показавшая её эффективность.

5. Разработанная методика выбора параметров и мест расстановки средств токовых защит внедрена в действующую электрическую сеть напряжением 380 В.

6. Произведена технико-экономическая оценка эффективности использования токовых защит совместно с разработанной методикой, показавшая повышение эффективности защиты от однофазных коротких замыканий. Повышение эффективности работы защиты от ОКЗ, в целом, позволяет повысить надежность работы электрической сети, уровень пожаро- и электробезопасности. В результате внедрения данной методики вероятность электропоражения уменьшится не менее чем в 4 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе предложено новое решение актуальной научно-технической задачи, состоящее в повышении уровня электробезопасности в сетях с глухо заземлённой нейтралью электроустановок до 1000 В при однофазных коротких замыканиях посредством применения на стадии проектирования и эксплуатации методики выбора параметров и мест расстановки токовых защит по воздушной линии напряжением 380 В.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы работы:

1. Проанализированы существующие методики расчета токов однофазного короткого замыкания в электрических сетях напряжением до 1000 В и факторы, влияющие на его величину. В результате анализа были выявлены неточности в методиках расчета токов ОКЗ и расчетов параметров короткозамкнутой цепи.

2. Разработаны рекомендации по уточнению методики расчета токов однофазного короткого замыкания. Вносимые поправки в методику расчета связаны с учётом влияния электрической дуги в месте замыкания, эффекта «теплого спада» и сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора и взаимного влияния указанных параметров.

3. Обоснована и построена компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В в программной среде Matlab-Simulink, отличающаяся возможностью задания сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора и параметров воздушной линии электропередачи напряжением 380 В.

4. Разработана методика выбора параметров и мест расстановки токовых защит по воздушной линии напряжением 380 В, применение которой на стадии проектирования и при эксплуатации обеспечивает время их срабатывания не более 5 с.

5. Методика выбора параметров и расстановки средств токовых защит передана филиалу «МРСК Урала»-«Челябэнерго» и используется им при эксплуатации и проектировании электрических сетей напряжением 380 В. На основании данной методики была проведена реконструкция защиты электрической сети напряжением 380 В, обеспечивающей электроэнергией потребителей села Селезян Еткульского района Челябинской области, что подтверждается соответствующими документами.

6. Выполнена оценка повышения уровня электробезопасности в электрических сетях с глухозаземлённой нейтралью напряжением до 1000 В при реализации разработанной методики выбора параметров и мест расстановки токовых защит

по воздушной линии напряжением 380 В. В результате внедрения данной методики вероятность электропоражения уменьшится не менее чем в 4 раза.

7. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Южно-Уральского государственного университета при изучении курсов «Безопасность жизнедеятельности» студентами направления «Электроэнергетика и электротехника», а также при подготовке специалистов по направлению «Техносферная безопасность».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авт. св-во. 1417097 (СССР). МКИ Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты линии электропередачи / В.А. Андреев, И.О. Карпов, А.Л. Дубов, А.Л. Буймистер // Бюллетень изобретений. – 1988. – № 30.
2. Авт. св-во. 1051638 (СССР). МКИ Н 02 Н 3/16. Устройство для защиты линии электрической сети от однофазного замыкания / Н.Т. Гурин, А.В. Кузнецов // Бюллетень изобретений. – 1983. – № 40.
3. Айзенфельд, А.И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / А.И. Айзенфельд, Г.М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
4. Анастасиев, П.И. Воздушные линии напряжением до 1000 В [Текст] / П.И. Анастасиев, Ю.А. Фролов. – М.: Энергия, 1963. – 168 с.
5. Андреев, В.А. Влияние заземляющих устройств нулевого провода на токи нулевой последовательности в воздушных сетях напряжением 0,38 кВ [Текст] / В.А. Андреев, А.Л. Дубов, В.Ф. Шишкин // Электричество. – 1989. – № 12. – С. 54–56.
6. Андреев, В.А. Учет заземляющих устройств нулевого провода в расчетах токов однофазного КЗ ВЛ 0,38 кВ [Текст] / В.А. Андреев, В.Ф. Шишкин, А.Л. Дубов // Известия вузов СССР. Энергетика. – 1991. – № 3. – С. 15–20.
7. Андриевский, Е.Н. Эксплуатация электроустановок в сельском хозяйстве [Текст] / Е.Н. Андриевский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 143 с.
8. Арутюнян, А.Г. Расчет параметров несимметричного режима трехфазных четырехпроводных сетей 0,38/0,22 кВ [Текст] / А.Г. Арутюнян // Промышленная энергетика. – 2010. – № 6. – С. 36–38.
9. Беккер, М.В. Анализ электротравматизма в отраслях народного хозяйства [Текст] / М.В. Беккер, А.С. Дальнов, Н.Я. Вышинская, С.В. Тварадзе // Промышленная энергетика. – 1989. – № 3. – С. 40–42.

10. Белов, А.В. О Перспективах применения системы заземления ИТ в сельском хозяйстве [Текст] / А.В. Белов // Вестник ЧГАА – 2012 – Т. 61. – С. 5–11.

11. Белов, А.В. Практические методы расчета однофазного короткого замыкания в сетях напряжением до 1кВ [Текст] / А.В. Белов, Ю.П. Ильин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 17–23.

12. Белоусов, Ю.Ф. О выполнении зануления по допустимому напряжению прикосновения [Текст] / Ю.Ф. Белоусов // Промышленная энергетика. – 1990. – № 7. – С. 48–50.

13. Беляев, А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ [Текст] / Беляев А.В. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – 230 с.

14. Богдан, А.В. Сравнение методов расчета однофазного КЗ в электроустановках до 1 кВ [Текст] / А.В. Богдан, В.А. Богдан, В.В. Савиных, В.В. Соболев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 11. – С. 30–31.

15. Богдан, В.А. Повышение эффективности защит сети 0,4 кВ при однофазных замыканиях: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.А. Богдан. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000 – 167 с.

16. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства [Текст] / И.А. Будзко, Н.М. Зуль. – М.: ВО Агропромиздат, 1990. – 498 с.

17. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства [Текст] / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

18. Валеев, Р.Г. Анализ защит воздушных линий электропередач напряжением 380 В от однофазных замыканий на землю [Текст] / Р. Г. Валеев // Безопасность в третьем тысячелетии: сборник материалов V научно-практической конференции: в 2 т.; под ред. А. И. Сидорова. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2012. – Т. 1. – 353 с.

19. Валеев, Р.Г. Исследование токов и напряжений в различных режимах работы воздушных линий напряжением 380 В на компьютерной модели / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, Г.С. Валеев, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т.2. – С. 149–150.

20. Валеев, Р.Г. Компьютерная модель для исследования несимметричных режимов работы воздушных линий напряжением 380 В [Текст] / Р.Г. Валеев, А.М. Ершов, А.И. Сидоров, А.В. Млоток // Материалы LII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»; под ред. д. т. н, проф. Н.С. Сергеева. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 131–135.

21. Валеев, Р.Г. Концепция построения защиты электрических сетей напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий [Текст] / Р. Г. Валеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 30–33.

22. Валеев, Р.Г. Методика проведения экспериментальных исследований параметров воздушных линий электропередачи напряжением 380 В [Текст] / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров, А.М. Ершов, Е.Л. Шахин // Электробезопасность. – 2012. – № 2–3. – С. 4–11.

23. Валеев, Р.Г. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB–SIMULINK / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, А.И. Сидоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 116–128.

24. Валеев, Р.Г. Об исследовании токовых защит воздушной линии напряжением 380 В в опытной электрической сети [Текст] / Р. Г. Валеев // Материалы LIII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»; под ред. д.т.н., проф. Н. С. Сергеева. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2014. – Ч. IV. – С. 106–111.

25. Валеев, Р.Г. Особенности расчетов токов однофазного короткого замыкания в электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями [Текст] / Р.Г. Валеев, А.М. Ершов, Г.С. Валеев, А.И. Сидоров. // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т.2. – С. 145–148.

26. Валеев, Р.Г. Повышение уровня электробезопасности путём секционирования воздушных линий 0,4 кВ [Текст] / Р. Г. Валеев // Электробезопасность. – 2014. – № 2. – С. 34–36.

27. Васильева, Т.Н. Надежность и техническое обслуживание электроэнергетических систем в сельском хозяйстве [Текст] / Т.Н. Васильева – Рязань: Издательство «ФГБОУ ВПО РГАТУ», 2013. – 195 с.

28. Васильева, Т.Н. Оценка влияния климатических факторов на отказы воздушных линий 0,4 кВ [Текст] / Т.Н. Васильева, Д.Н. Микрюков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 6. – С. 16.

29. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.

30. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е перераб. и доп. [Текст] / А.И. Вольдек – Л.: Энергия, 1974. – 840с.

31. Воронов, О.Н. Влияние повторных заземлений в линиях 0,38 кВ на работу защиты от однофазных К.З. [Текст] / О.Н. Воронов, А.П. Сердешнов, Г.П. Чучман, Н.Е. Шевчик // Энергетик. – 1988. – № 7. – С. 24.

32. Гессен, В.Ю. Аварийные режимы и защита от них в электрических сетях сельскохозяйственного назначения [Текст] / В.Ю. Гессен. – М. – Л.: Сельхозгиз, 1955. – 369 с.

33. Глазунов, А.А. О расчетах токов коротких замыканий в электрических сетях напряжением до 1000 В [Текст] / А.А. Глазунов, Ю.А. Фокин // Электрические станции. – 1964. – № 9. – С. 64–68.

34. Глазунов, А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи [Текст] / А.А. Глазунов. Т. 1. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.

35. Городской, Д.А. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей с введением Фортестью К.Л. / Пер. с англ. Л.Е. и М.Е. Сыркиных. Под ред. Городского Д.А. / Учебное пособие для энергетических ВТУЗов. – Москва–Ленинград, ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 48 с.

36. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия [Текст] – М.: Издательство стандартов, 1999. – 38 с.

37. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 42 с.

38. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей [Текст] / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Аты: Кайнар, 1984. – 128 с.

39. Григорьев, Н.Д. Анализ причин повреждаемости элементов сетей напряжением до 1000 В [Текст] / Н.Д. Григорьев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 1. – С. 47–49.

40. Дубов, А.Л. Методика расчёта режимов и комплексная защита воздушных линий напряжением до 1 кВ: автореферат дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.Л. Дубов. – Екатеринбург.: УПИ, 1992 – 21 с.

41. Егорушкин, И.О. Влияние теплового спада тока короткого замыкания на функционирование сельских электрических сетей напряжением 0,4 кВ: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / И.О. Егорушкин. – Красноярск: КрасГАУ, 2008. – 334 с.

42. Ерёмина, Т.В. Методы анализа риска электротравматизма в электроустановках агропромышленного комплекса [Текст] / О.К. Никольский, Т.В. Ерёмина // Энерго- и ресурсосбережения. XXI век: сб. материалов VII Междунар. науч.-практич. интернет-конф. – 2009. – №4. – С. 145–155.

43. Ерёмина, Т.В. Основы электромагнитной совместимости [Текст]: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. / Р.Н. Карякин, Л.В. Куликова, О.К. Никольский, А.А. Сошников, Н.Т. Герцен, Т.В. Ерёмина, А.А. Зайцев / под ред. Р.Н. Корякина Гриф Минобрнауки. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2009. – 470 с.

44. Ерёмина, Т.В. Принципы оценки риска и остаточного ресурса электропроводки зданий и сооружений АПК [Текст] / О.К. Никольский, Т.В. Ерёмина // Международный научный журнал. – 2010. – №4. – С. 87–90.

45. Ершов, А.М. Исследование аварийных режимов в сельских электрических сетях напряжением 380 В / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 6. – С. 18–21.

46. Ершов, А. М. Построение защиты воздушных линий электропередачи напряжением 380 В от однофазных замыканий на землю [Текст] / А.М. Ершов, А.И. Сидоров, Р.Г. Валеев // Безопасность в третьем тысячелетии: сборник мате-

риалов V научно-практической конференции: в 2 т. / под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2012. – Т. 1. – 353 с.

47. Ершов, А.М. Разработка физической модели электрической сети напряжением 380 В [Текст] / А. М. Ершов, Р. Г. Валеев, А. И. Сидоров, А. В. Млоток // Электробезопасность. – 2014. – № 1. – С. 4–15

48. Ершов, А.М. Физическая модель для исследования несимметричных режимов работы электрической сети напряжением 380 В / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Энергетика в современном мире: сборник статей VI Международной заочной научно-практической конференция (2–6 декабря 2013 г.). – Чита: ЗабГУ, 2013 – С. 46–52.

49. Жуков, В.В. Влияние комплексной нагрузки на ток несимметричных коротких замыканий в электроустановках до 1000 В [Текст] / В.В. Жуков // Известия вузов. Энергетика. – 1985. – № 12. – С. 47–50.

50. Жуков, В.В. Исследование режимов дуговых коротких замыканий в электроустановках низкого напряжения [Текст] / В.В. Жуков // Известия РАН. Энергетика. – 1993. – № 4. – С. 103–109.

51. Жуков, В.В. Исследование режимов коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1000 В [Текст] / В.В. Жуков // Электрические станции. – 1999. – № 5. – С. 37–43.

52. Жуков, В.В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ [Текст] / В.В. Жуков. – М.: Издательство МЭИ. – 2004. – 192 с.

53. Жуков, В.В. Особенности расчета токов короткого замыкания в электрических сетях до 1000 В [Текст] / В.В. Жуков // Электрические станции. – 1985. – № 5. – С. 61–65.

54. Жуков, В.В. Развитие методов расчета и экспериментального определения токов короткого замыкания [Текст] / В.В. Жуков // Энергетик. – 1998. – № 11. – С. 20–21.

55. Жуков, В.В. Сравнительный анализ методов расчета токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ [Текст] / В.В. Жуков, Н.П.

Крючков, Ю.П. Кузнецов, Б.Н. Неклепаев // Электрические станции – 1996. – № 6. – С.41–51.

56. Жуков, В.В. Учет электрической дуги при расчете токов короткого замыкания в электроустановках низкого напряжения [Текст] / В.В. Жуков // Промышленная энергетика. – 1992. – № 8–9. – С. 16–19.

57. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей [Текст] / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушилов, С.В. Страхов / – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

58. Каганович, Е.А. Испытания трансформаторов мощностью до 6300 кВА и напряжением до 35 кВ [Текст] / Е.А. Каганович, И.М. Райхлин – М.: Энергия, 1980. – 312 с.

59. Казак, Н.А. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] / Н. А. Казак, Б. А. Князевский, С. С. Лазарев, Д. С. Лившиц. – М.: Энергия, 1966. – 535 с.

60. Каталог 07.04.08-84 «Предохранители плавкие серии ПН2». Электротехника СССР. – М.: Информэлектро, 1985. – 4 с.

61. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем [Текст] / В.Г. Китушин / – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.

62. Козюков В.А. Опытное определение параметров нулевой последовательности трансформаторов [Текст] / В.А. Козюков, А.А. Пястолов // Электрические станции. – 1967. – №1. – С. 77–79.

63. Координация защит низкого напряжения. Техническая коллекция Schneider Electric: Выпуск 23. – TECHCOL23RU Schneider Electric, 2008. – 51 с.

64. Круг, К.А. Основы электротехники [Текст] / К.А. Круг. – М.–Л.: ОНТИ, 1936. – 887 с.

65. Крючков, И.П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов [Текст] / И.П. Крючкова, В.А. Старшинова, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 568 с.

66. Кузнецов, А.В. Повышение эффективности функционирования устройств управления передачей электроэнергии в системах электроснабжения по-

требителей: дис. ... докт. техн. наук [Текст] / А.В. Кузнецов. – Ульяновск: УГТУ, 2010. – 395 с.

67. Кузнецов, В.С. Некоторые вопросы повышения электробезопасности при однофазных коротких замыканиях в сетях до 1000 В [Текст] / В.С. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 1981. – № 11. – С. 49–52.

68. Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем [Текст] / Лосев С.Б., Чернин А.Б. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 527 с.

69. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок (ПОТ РМ-016-2001) – М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 179 с.

70. Методические указания по выбору устройств релейной защиты в сетях 0,38–35 кВ сельскохозяйственного назначения // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 11. – М.: ВГПИНИИ «Сельэнергопроект», 1976. – 116 с.

71. Методические указания по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электростанций и подстанции с учетом влияния электрической дуги [Текст] – М.: СПО ОРГРЭС, 1993. – 50 с.

72. Млоток, А.В. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В [Текст] / А.В. Млоток, А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.И. Сидоров // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2014. – № 2 (19). – С. 96–107.

73. Мотуско, Ф.Я. Защитные устройства в электроустановках [Текст] / Ф.Я. Мотуско. – М. «Энергия», 1973. – 200 с.

74. Найфельд, М.Р. Заземления, защитные меры электробезопасности [Текст] / М.Р. Найфельд. – М.: «Энергия», 1971. – 312 с.

75. Найфельд, М.Р. Сопротивления трансформаторов в режиме однофазного замыкания в сетях до 1000 В / М.Р. Найфельд, П.И. Спеваков // Промышленная энергетика. – 1968. – № 11. – С. 34–38.

76. Номограммы и таблицы расчётов электрических сетей 0,38 кВ // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 7. – М.: ВГПИНИИ «Сельэнергопроект», 1996. – 148 с.

77. Номоконова, О. В. Применение нечетких множеств в оценке и прогнозировании опасных ситуаций [Текст] / Диссертация на соискание канд. техн. наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 100 с.

78. Нормы технологического проектирования электрических сетей сельскохозяйственного назначения [Текст]. – М.: Сельэнергопроект, 1988. – 16 с.

79. Окраинская, И.С. Организационно-системные методы повышения уровня электробезопасности на открытых горных работах [Текст] / Диссертация на соискание канд. техн. наук. – Челябинск: ЧГТУ, 1997. – 155 с.

80. Олин, Д.М. Совершенствование методики расчета и средств диагностики устройств защиты в сельских сетях 0,38 кВ: автореферат дис. канд. техн. наук [Текст] / Олин Д.М.. – Москва: 2009. – 18 с.

81. Ослон, А.Б. Зануления как способ обеспечения электробезопасности [Текст] / А.Б. Ослон // Промышленная энергетика. – 1981. – № 5. – С. 51–55.

82. Ослон, А.Б. Защиты от однополюсных замыканий в электроустановках напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью [Текст] / А.Б. Ослон // Промышленная энергетика. – 1981. – № 7. – С. 45–48.

83. Петров, Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов [Текст] / Г.Н. Петров – М.: "Энергия", 1974. – 240 с.

84. Повреждаемость комплектных трансформаторных подстанций сельских распределительных электрических сетей (из материалов ВНИИЭ) // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 4. – М.: ВГПИНИИ «Сельэнергопроект», 1996. – 148 с.

85. Положение о единой технической политике ОАО «Холдинг МРСК» в распределительном сетевом комплексе» [Текст] – М.: ОАО «Холдинг МРСК», 2011 г. – 102 с.

86. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе» [Текст] – М.: ОАО «Россети», 2013 г. – 196 с.

87. Полуниин, В.Б. Исследование способов повышения эффективности защиты зануления. Автореферат кандидатской диссертации М.: МЭИ, 1976. – 28 с.

88. Попов, Н.М. Повышение надежности электроснабжения сельского хозяйства путем совершенствования релейных защит от аварийных режимов в сетях 0,38...35 кВ: диссертация докт. техн. наук [Текст] / Попов Н.М.. – Кострома: 2006. – 370 с.

89. Пособие по проектированию городских и поселковых электрических сетей (к ВСН 97–83) / Гипрокоммунэнерго, МНИИТЭП. – М.: Стройиздат, 1987. – 208 с.

90. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации – М.: Энергосервис, 2003. – 367 с.

91. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергосервис, 2003. – 276 с.

92. Правила устройства электроустановок [Текст] / Минтопэнерго Российской Федерации. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Главгосэнергонадзор России, 1998. – 609 с.

93. Правила устройства электроустановок [Текст]: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

94. Пястолов А.А. Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов с алюминиевыми обмотками [Текст] / А.А. Пястолов, Е.П. Попов // Электрические станции. – 1963. – № 4 – С.82–84.

95. Пястолов, А.А. Особенности несимметричных режимов работы трансформаторов со схемой звезда-звезда с нулем [Текст] / А.А. Пястолов, В.А. Козюков // Промышленная энергетика. – 1968. – № 4. – С. 37–40.

96. Рожавский, С.М. Проблема несимметрии в сельских электрических сетях (Обзорная информ.) [Текст] / сост. С.М. Рожавский // Сер. Линии электропередачи и подстанции, сельская электрификация. – М.: Информэнерго, 1981. – 55 с.

97. Рожавский, С.М. Статистические характеристики несимметрии токов и напряжений в сельских сетях 0,4/0,23 кВ [Текст] / С.М. Рожавский, Ю.Ф. Свергун // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. – М.: Изд-во ОНТИ «Сельэнергопроект». – 1971. – № 9. – С. 53–62.

98. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 1. – М.: РАО «ЕЭС России» АО ООТ РОСЭП «Сельэнергопроект», 2001. – 47 с.

99. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98 [Текст] / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.

100. Рябинин, А.И. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно сложных схем [Текст] / А.И. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М. Радио и связь. – 1981. – 264 с.

101. Савицкий, Л.В. Обоснование функции систем контроля состояния зануления [Текст] / Л.В. Савицкий, К.С. Фетько, Ш.С. Сайдалиев, А.И. Сидоров // Электробезопасность. – 2012. – № 4. – С. 18–21.

102. Сакара, А.В. Методические рекомендации по проведению испытаний электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей / А.В. Сакара. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 216 с.

103. Селивахин, А.И. Защита воздушной линии электропередачи 0,38 кВ от обрыва фазного провода [Текст] / А.И. Селивахин, В.П. Кобазев, Х.М. Желиховский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 7. – С. 55–57.

104. Селивахин, А.И. Эксплуатация электрических распределительных сетей [Текст] / А.И. Селивахин, Р.Ш. Сагутдинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 239 с.

105. Семёнова, М.И. Обоснование перехода от глухозаземлённой нейтрали к изолированной в сетях электроустановок сельскохозяйственного назначения напряжением до 1000 В / Диссертация на соискание канд. техн. наук. – Челябинск, 2011. – 153 с.

106. Семенова, М.Н. Общая характеристика воздушных линий напряжением до 1000 В [Текст] / М.Н. Семенова // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (ЭКОЛОГИЯ – 2008): материалы V Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГАТУ. – 2008. – Т. 1. – С. 323–328.
107. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 314 с.
108. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: дис. ... докт. техн. наук [Текст] / А.И. Сидоров. – Челябинск: ЧГТУ, 1994 – 263 с.
109. Ситчихин, Ю.В. Повышение безопасности при эксплуатации электроустановок 6–10 кВ открытых горных разработок [Текст] / Диссертация на соискание канд. техн. наук. – М.:МГИ, 1986. – 235 с.
110. Спеваков, П.И. Выбор сечения нулевых проводов в четырёхпроводных сетях / П.И. Спеваков // Промышленная энергетика. – 1961. – № 3. – С. 46–52.
111. Спеваков, П.И. К проектированию сетей зануления в силовых установках / П.И. Спеваков // Электричество. – 1939. – № 8. – С. 69.
112. Спеваков, П.И. Определение расчётного сопротивления петли зануления / П.И. Спеваков // Электричество. – 1965. – № 9. – 71–75.
113. Спеваков, П.И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В [Текст] / П.И. Спеваков – М.: Энергия, 1971. – 86 с.
114. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.
115. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования [Текст] / Под ред. Ю.Г. Барыбина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
116. Справочник по проектированию электросетей в сельской местности [Текст] / Э.Я. Гричевский, П.А. Катков, А.М. Карпенко и др.; Под ред. П.А. Каткова, В.И. Франгуляна. – М.: Энергия, 1980. – 352 с.

117. Суворов, И.Ф. Моделирование электроопасной ситуации в системах электроснабжения с глухозаземлённой нейтралью до 1000 В [Текст] / И.Ф. Суворов // Электробезопасность. – 2005. – №3. – С. 3–7.

118. Суворов, И.Ф. Развитие теории, разработка методов и средств обеспечения электробезопасности в системах электроснабжения напряжением до 1000 В: дис. ... докт. техн. наук [Текст] / И.Ф. Суворов. – Чита: ЧитГУ, 2006. – 457 с.

119. Техническая политика ОАО «МРСК Центра» [Текст] 2010 г. – 66 с.

120. Тудоровский, Я.Л. К вопросу о сопротивлении нулевой последовательности ВЛ 0,4 кВ / Я.Л. Тудоровский // Промышленная энергетика. – 1988. – № 1. – С. 36–39.

121. Тынянский, В.Г. Распознавание режимов работы воздушных линий напряжением 0,4 кВ и электроприёмников: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.Г. Тынянский. – Новочеркасск.: ЮРГТУ, 2005. – 106 с.

122. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах [Текст]: Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

123. Усихин, В.Н. О влиянии нагрузки на токи КЗ в электроустановках переменного тока до 1 кВ / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 2001. – № 1.

124. Усихин, В.Н. О предельных длинах электрических сетей по условию отключения однофазных коротких замыканий / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1991. – № 8.

125. Усихин, В.Н. Об оценке сопротивления электрической дуги при расчетах короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В / В.Н. Усихин // Электрические станции. – 1994. – № 7. – С. 55–57.

126. Усихин, В.Н. Об учете электрической дуги в расчетах токов короткого замыкания в сетях до 1000 В / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1994. – № 5. – С. 27–32.

127. Усихин, В.Н. Проверка надежности срабатывания защитных аппаратов при однофазных токах короткого замыкания / В.Н. Усихин // Инструктивные

указания по проектированию электротехнических промышленных установок. – М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект». – 1976. – № 12.

128. Федосеев, А.М., Релейная защита электроэнергетических систем [Текст] / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

129. Херсонский, А.С. Приставка к автоматическим выключателям для защиты сельских электросетей 0,4 кВ [Текст] / А.С. Херсонский, Я.М. Фексон // Электрические станции. – 1977. – № 10. – С. 69–70.

130. Херсонский, А.С. Селективная защита от однофазных коротких замыкания ФО-0,4 для распределительных сетей 0,4 кВ / А.С. Херсонский, А.Ш. Левин, Я.М. Фексон // Электрические станции. – 1975. – № 3. – С. 47–48.

131. Цапенко, Е.Ф. Защитные свойства зануления при напряжении 660 В [Текст] / Е.Ф. Цапенко, Кораблев В.П. // Промышленная энергетика. – 1972. – № 10. – С. 11–14.

132. Циркуляр № Ц-02-96 О внедрении экспериментальных методов проверки токов КЗ и защитных характеристик автоматических выключателей присоединений 0,4 кВ электростанций и подстанций, 1996. – М.: РАО «ЕЭС России».

133. Черкасова, Н.И. Основные принципы оценки материального ущерба от электротравматизма людей [Текст] / Н.И. Черкасова, А.Ф. Костюков, Г.А. Гончаренко // Электробезопасность. – 2014. – №2. – С. 30–34.

134. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

135. Чунихин, А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – 3-е изд. [Текст] / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 720 с.

136. Шабад, М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 136 с.

137. Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ [Текст] / А.И. Шалин // Новости электротехники – 2006. – №1.

138. Шиша, М. А. Расчет защит сетей напряжением до 1 кВ [Текст] / М.А. Шиша, В. М. Александров, В.Н. Рычагов // Новости электротехники. – 2012. – № 2(74).
139. Шиша, М. А. Влияние электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ [Текст] / М.А. Шиша, В. М. Александров, В.Н. Рычагов // Новости электротехники. – 2011. – № 6(72). – С. 38–41.
140. Шиша, М. А. Влияние электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ [Текст] / М.А. Шиша, В. М. Александров, В.Н. Рычагов // Новости электротехники. – 2012. – № 1(73).
141. Шиша, М.А. Разработка методики учёта влияния электрической дуги на токи короткого замыкания в цепях собственных нужд напряжением до 1 кВ электрических станций и подстанций: автореферат дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.А. Шиша. – М.: МЭИ, 1995. – 20 с.
142. Электротехнический справочник Т.3.: кн.1: Производство, передача и распределение электрической энергии [Текст] / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергия, 1982. – 656 с.
143. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии [Текст] / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.
144. Blackburn, J. L. Protective Relaying. Principles and Applications [Text] / J. L. Blackburn, T. J Domin, 3rd ed. – CRC Press, 2006. – 638 p.
145. Charles L. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks". Presented at the 34th annual convention of the AIEE (American Institute of Electrical Engineers) in Atlantic City, N.J. on 28 July 1918. Published in: AIEE Transactions, vol. 37, part II, pages 1027–1140 (1918).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справочные данные по сопротивлениям прямой, обратной и нулевой последовательностей силовых трансформаторов 6–35/0,4 кВ

Таблица А.1 – Расчетные сопротивления масляных трансформаторов по ГОСТ 11920-66 и ГОСТ 12022-66 при вторичном напряжении 400/230 В [75]

Мощность трансформатора, кВА	Первичное напряжение, кВ	Схема соединения обмоток	$R_{1T} = R_{2T}$, МОм	$X_{1T} = X_{2T}$, МОм	R_{0T} , МОм	X_{0T} , МОм	$\cos\varphi_0$	Z_{0T} , МОм	$Z_T^{(1)}$, МОм
25	6–10	Y/Y _H	153	244	1650	1930	0,65	2542	3110
40	6–10	Y/Y _H	88	157	952	1269	0,6	1587	1949
63	6–10	Y/Y _H	52	102	504	873	0,5	1009	1237
	20	Y/Y _H	52	116	397	787	0,45	882	1136
100	6–10	Y/Y _H	31,5	64,7	254	582	0,4	635	779
	20–35	Y/Y _H	31,5	99	195	520	0,35	556	764
160	6–10	Y/Y _H	16,6	41,7	151	367	0,38	397	487
	20–35	Y/Y _H	16,6	62,8	122	326	0,35	347	478
250	6–10	Y/Y _H	9,4	27,2	96,5	235	0,38	254	312
	20–35	Y/Y _H	9,4	40,5	77,8	208	0,35	222	305
400	6–10	Y/Y _H	5,5	17,1	55,6	149	0,35	159	195
	20–35	Y/Y _H	5,5	25,4	48,7	130	0,35	139	191
	6–10	Δ/Y_H	5,9	21,2	–	–	–	22	66
630	6–10	Y/Y _H	3,1	13,6	30,3	96,2	0,3	101	129
	20–35	Y/Y _H	3,1	16,2	26,2	84,2	0,3	88	121
	6–10	Δ/Y_H	3,4	13,5	–	–	–	14	42
1000	6–10	Y/Y _H	2,0	8,5	19,1	60,6	0,3	63,5	81
	20–35	Y/Y _H	2,0	10,3	16,7	53,1	0,3	5,6	77
	6–10	Δ/Y_H	2,0	8,5	–	–	–	2,6	26
	20–35	Δ/Y_H	2,0	10,3	–	–	–	3,1	31

Таблица А.2 – Расчетные сопротивления сухих трансформаторов с вторичном напряжении 400/230 В [75]

Мощность трансформатора, кВА	Схема соединения обмоток	$R_{1T} = R_{2T}$, мОм	$X_{1T} = X_{2T}$, мОм	R_{0T} , мОм	X_{0T} , мОм	$\cos\varphi_0$	Z_{0T} , мОм	$Z_T^{(1)}$, мОм
160	Δ/Y_H	16,9	52,4	–	–	–	–	165
180	Y/Y_H	14,8	46,6	134	326	0,38	353	451
250	Δ/Y_H	9,7	33,8	–	–	–	–	106
320	Y/Y_H	7,7	26,4	69,4	186	0,35	198	254
400	Δ/Y_H	5,4	21,3	–	–	–	22	66
560	Y/Y_H	3,8	15,3	34	108	0,3	113	145
630	Δ/Y_H	2,9	13,7	–	–	–	14	42
750	Y/Y_H	2,5	11,4	25,4	80,7	0,3	85	108
1000	Δ/Y_H	1,8	8,6	–	–	–	8,8	27
	Y/Y_H	2,1	8,6	19,1	60,6	0,3	64	82

Таблица А.3 – Расчетные сопротивления масляных трансформаторов по ГОСТ 401-41 со схемой соединения Y/Y_H при вторичном напряжении 400/230 В [75]

Тип трансформатора	Первичное напряжение, кВ	$R_{1T} = R_{2T}$, мОм	$X_{1T} = X_{2T}$, мОм	R_{0T} , мОм	X_{0T} , мОм	$\cos\varphi_0$	Z_{0T} , мОм	$Z_T^{(1)}$, мОм
ТМ-20, ТМА-20	6–10	240	3688	1587	2749	0,5	3174	414
ТМ-30	6–10	149	2510	1058	1831	0,5	2116	270
ТМ-50	6–10	84,8	1542	635	1099	0,5	1267	1622
ТМ-100	6–10	38,4	79,2	2541	582	0,4	635	811
ТМА-100	35	38,4	96,7	195	520	0,35	556	768
ТСМА-100	6–10	33,1	64	2541	582	0,4	635	779
ТСМ-100/35	35	38,4	97	195	520	0,35	556	762
ТМ-180, ТМА-180	6–10	19,8	44,7	134	326	0,38	353	451
ТМ-180, ТМА-180	35	20,2	54,1	108	289	0,35	309	425
ТМ-320, ТМА-320	6–10	9,5	25,8	69,4	186	0,35	198	254
ТМ-320, ТМА-320	35	9,7	31,0	60,8	163	0,35	174	239
ТМ-560, ТМА-560	6–10	4,8	15,0	34,0	108	0,3	113	145
ТМ-560, ТМА-560	35	4,8	17,9	29,8	94,7	0,3	99,2	137
ТМ-750, ТМА-750/10	6–10	3,4	11,2	25,4	80,7	0,3	84,6	108
ТМ-1000, ТМА-1000/10-10 А	6–10	2,4	8,5	19,1	60,6	0,3	63,5	82
ТМ-1000, ТМА-1000/35 А	20–35	2,4	10,1	16,7	53,1	0,3	55,6	77

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты расчета тока однофазного короткого замыкания

Таблица Б1.1 – Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-160 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	4893,0	4893,0	4893,0	4893,0	4893,0	4893,0
25	1763,0	2260,0	2608,0	2920,0	3154,0	3318,0
50	1012,0	1389,0	1696,0	2010,0	2273,0	2471,0
75	705,7	995,3	1247,0	1521,0	1765,0	1960,0
100	541,2	774,1	983,3	1220,0	1439,0	1620,0
125	438,7	632,9	810,9	1017,0	1214,0	1380,0
150	368,7	535,1	689,8	872,1	1049,0	1201,0
175	318,1	463,4	599,9	762,9	923,2	1063,0
200	279,5	408,5	530,7	677,8	824,2	952,9
225	249,4	365,3	475,8	609,8	744,3	863,6
250	225,1	330,4	431,1	554,1	678,4	789,5
275	205,1	301,5	394,1	507,8	623,2	727,1
300	188,4	277,3	362,9	468,5	576,3	673,8
325	174,1	256,6	336,4	434,9	535,9	627,8
350	161,9	238,8	313,4	405,8	500,9	587,6
375	151,3	223,4	293,3	380,3	470,1	552,3
400	142,0	209,8	275,7	357,8	442,9	520,9
425	133,8	197,8	260,1	337,9	418,6	492,9
450	126,4	187,1	246,1	320,1	396,9	467,8
475	119,9	177,4	233,6	303,9	377,4	445,1
500	113,9	168,7	222,3	289,4	359,6	424,5

Таблица Б.2 – Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-250 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	7497,1	7497,1	7497,1	7497,1	7497,1	7497,1
25	1954,8	2625,2	3143,1	3643,6	4041,9	4331,8
50	1065,3	1506,1	1890,2	2309,3	2682,9	2979,9
75	730,1	1051,1	1343,7	1679,9	1996,3	2260,2
100	555,0	806,4	1040,9	1317,8	1586,6	1817,5
125	447,5	653,9	849,0	1083,3	1315,5	1518,8
150	374,9	549,8	716,6	919,5	1123,1	1304,0
175	322,5	474,2	619,9	798,5	979,7	1142,2
200	283,0	416,9	546,2	705,6	868,6	1016,0
225	252,1	372,0	488,1	632,0	780,1	914,8
250	227,3	335,7	441,2	572,3	707,9	831,9
275	206,9	305,9	402,4	522,9	648,0	762,8
300	189,9	281,0	370,0	481,4	597,4	704,3
325	175,5	259,8	342,4	445,9	554,1	654,1
350	163,1	241,6	318,6	415,3	516,6	610,5
375	152,3	225,8	297,9	388,7	483,9	572,4
400	142,9	211,9	279,7	365,2	455,1	538,8
425	134,5	199,6	263,6	344,4	429,5	508,9
450	127,1	188,7	249,3	325,9	406,7	482,2
475	120,5	178,9	236,4	309,2	386,1	458,1
500	114,5	170,1	224,8	294,2	367,5	436,3

Таблица Б.3 –Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-400 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	12069,3	12069,3	12069,3	12069,3	12069,3	12069,3
25	2098,5	2932,2	3636,3	4377,6	5014,1	5503,6
50	1102,4	1592,7	2042,8	2563,6	3057,3	3471,4
75	746,5	1090,7	1415,8	1805,4	2190,1	2525,5
100	564,2	828,9	1082,5	1392,0	1704,3	1982,6
125	453,4	668,3	876,0	1132,2	1394,3	1631,2
150	379,0	559,9	735,6	954,0	1179,5	1385,3
175	325,5	481,6	633,9	824,2	1022,0	1203,7
200	285,3	422,6	556,9	725,5	901,5	1064,1
225	253,9	376,4	496,6	647,9	806,4	953,5
250	228,8	339,4	448,1	585,2	729,5	863,8
275	208,1	309,0	408,2	533,6	665,9	789,4
300	190,9	283,5	374,8	490,4	612,5	726,8
325	176,3	262,0	346,5	453,6	567,1	673,4
350	163,8	243,5	322,1	422,0	527,9	627,4
375	152,9	227,4	301,0	394,5	493,8	587,2
400	143,4	213,3	282,4	370,3	463,8	551,8
425	135,0	200,9	266,0	349,0	437,2	520,5
450	127,6	189,8	251,4	330,0	413,6	492,5
475	120,9	179,9	238,4	312,9	392,3	467,4
500	114,9	171,0	226,6	297,5	373,2	444,7

Таблица Б.4 –Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-630 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	15429,6	15429,6	15429,6	15429,6	15429,6	15429,6
25	2167,0	3081,3	3883,0	4758,8	5536,1	6148,0
50	1119,9	1633,2	2114,3	2684,4	3238,4	3713,0
75	754,4	1109,1	1449,0	1863,2	2280,0	2649,7
100	568,6	839,3	1101,5	1425,7	1757,7	2057,8
125	456,3	675,1	888,3	1154,3	1429,6	1681,4
150	381,0	564,5	744,2	969,5	1204,6	1421,2
175	327,0	485,1	640,3	835,7	1040,6	1230,7
200	286,4	425,2	561,8	734,4	916,0	1085,1
225	254,8	378,5	500,5	654,9	817,9	970,3
250	229,5	341,1	451,2	591,0	738,9	877,5
275	208,7	310,4	410,8	538,4	673,7	800,8
300	191,4	284,7	377,0	494,4	619,1	736,5
325	176,7	263,0	348,3	457,1	572,7	681,7
350	164,2	244,3	323,7	425,0	532,8	634,5
375	153,3	228,2	302,4	397,1	498,0	593,5
400	143,7	214,0	283,7	372,6	467,5	557,4
425	135,3	201,5	267,1	351,0	440,6	525,4
450	127,8	190,3	252,4	331,7	416,6	496,9
475	121,1	180,4	239,2	314,5	395,0	471,4
500	115,1	171,4	227,4	299,0	375,6	448,3

Таблица Б.5 – Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-160 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	1404,2	1404,2	1404,2	1404,2	1404,2	1404,2
25	988,3	1093,2	1149,4	1192,4	1221,7	1241,3
50	722,3	865,5	952,6	1023,7	1073,9	1107,9
75	560,2	706,9	805,3	890,9	954,1	997,9
100	454,9	593,8	693,8	785,7	856,1	906,3
125	381,9	510,3	607,6	701,0	775,1	829,1
150	328,7	446,7	539,6	631,9	707,3	763,5
175	288,3	396,8	484,8	574,6	649,9	707,0
200	256,6	356,7	439,7	526,5	600,8	658,1
225	231,2	323,8	402,1	485,6	558,4	615,3
250	210,3	296,4	370,3	450,4	521,3	577,6
275	192,8	273,2	343,1	419,9	488,8	544,1
300	178,0	253,3	319,6	393,2	460,0	514,2
325	165,3	236,1	299,0	369,6	434,4	487,4
350	154,3	221,1	280,9	348,6	411,4	463,2
375	144,6	207,9	264,9	329,9	390,7	441,2
400	136,1	196,1	250,5	313,0	371,9	421,2
425	128,6	185,6	237,6	297,8	354,9	403,0
450	121,8	176,2	226,0	284,0	339,3	386,2
475	115,7	167,7	215,5	271,3	325,0	370,7
500	110,2	159,9	205,8	259,8	311,9	356,4

Таблица Б.6 – Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-250 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	2182,0	2182,0	2182,0	2182,0	2182,0	2182,0
25	1287,2	1489,9	1608,4	1701,9	1766,7	1810,3
50	853,5	1078,7	1232,5	1367,0	1466,5	1535,6
75	630,3	834,3	987,6	1132,6	1246,2	1328,2
100	497,7	676,9	819,9	962,8	1080,1	1167,7
125	410,5	568,2	699,3	835,5	951,4	1040,4
150	349,1	489,1	608,8	737,0	849,3	937,4
175	303,6	429,1	538,7	658,8	766,4	852,5
200	268,5	382,1	482,9	595,3	697,9	781,4
225	240,6	344,2	437,4	542,8	640,5	721,0
250	218,0	313,2	399,6	498,6	591,7	669,2
275	199,2	287,2	367,8	461,1	549,6	624,2
300	183,4	265,2	340,7	428,7	513,2	584,8
325	170,0	246,4	317,3	400,6	481,2	550,1
350	158,3	230,0	296,8	375,9	452,9	519,2
375	148,2	215,6	278,9	354,1	427,7	491,6
400	139,2	203,0	262,9	334,6	405,2	466,7
425	131,3	191,7	248,7	317,1	384,9	444,3
450	124,3	181,6	236,0	301,4	366,5	423,8
475	117,9	172,6	224,4	287,2	349,8	405,2
500	112,2	164,3	214,0	274,2	334,6	388,1

Таблица Б.7 – Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-400 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	3501,5	3501,5	3501,5	3501,5	3501,5	3501,5
25	1600,7	1966,6	2202,0	2398,5	2538,8	2634,1
50	964,7	1286,7	1531,9	1765,7	1949,8	2082,9
75	684,5	945,8	1161,5	1383,6	1570,9	1713,2
100	529,3	745,3	931,8	1133,3	1311,2	1451,4
125	431,1	614,2	776,8	958,1	1123,3	1257,3
150	363,5	522,0	665,4	829,0	981,7	1108,2
175	314,2	453,7	581,8	730,2	871,4	990,3
200	276,6	401,1	516,7	652,3	783,1	894,8
225	247,1	359,5	464,6	589,3	710,9	815,9
250	223,2	325,6	422,0	537,3	650,8	749,7
275	203,6	297,6	386,6	493,7	600,1	693,4
300	187,1	274,0	356,6	456,6	556,6	644,9
325	173,1	253,8	330,9	424,7	518,9	602,7
350	161,0	236,4	308,7	396,9	486,1	565,7
375	150,5	221,3	289,2	372,6	457,1	532,9
400	141,3	207,9	272,1	351,0	431,4	503,7
425	133,1	196,1	256,9	331,8	408,4	477,6
450	125,9	185,6	243,3	314,6	387,7	454,0
475	119,4	176,1	231,0	299,1	369,0	432,6
500	113,5	167,5	219,9	285,0	352,0	413,1

Таблица Б.8 – Результаты расчёта металлического тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-630 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	5260,5	5260,5	5260,5	5260,5	5260,5	5260,5
25	1840,3	2381,8	2764,4	3104,6	3357,0	3531,6
50	1036,9	1436,1	1765,5	2103,4	2386,2	2599,0
75	717,9	1019,6	1284,5	1575,3	1835,5	2042,4
100	548,3	788,7	1006,8	1255,4	1486,9	1677,8
125	443,3	642,6	827,0	1042,1	1248,0	1422,0
150	372,0	542,0	701,3	890,3	1074,5	1233,0
175	320,5	468,6	608,6	776,8	943,0	1088,0
200	281,4	412,6	537,5	688,8	840,0	973,4
225	250,9	368,6	481,3	618,7	757,2	880,4
250	226,3	333,0	435,6	561,5	689,2	803,6
275	206,1	303,7	397,9	513,9	632,3	739,1
300	189,2	279,1	366,1	473,8	584,1	684,1
325	174,9	258,2	339,1	439,4	542,7	636,7
350	162,6	240,2	315,8	409,7	506,8	595,4
375	151,9	224,6	295,4	383,8	475,3	559,2
400	142,5	210,8	277,5	360,9	447,5	527,1
425	134,2	198,7	261,7	340,6	422,8	498,5
450	126,8	187,9	247,6	322,5	400,6	472,8
475	120,2	178,2	234,9	306,2	380,7	449,6
500	114,3	169,4	223,5	291,4	362,6	428,6

Таблица Б.9 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-160 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	1176,6	1176,6	1176,6	1176,6	1176,6	1176,6
25	808,5	921,1	974,5	1012,6	1036,8	1053,8
50	619,5	747,1	822,5	881,7	922,1	951,9
75	466,8	602,2	694,8	772,6	827,0	867,7
100	403,6	526,7	613,9	693,2	752,2	798,6
125	348,3	470,7	551,8	629,7	690,5	740,6
150	305,8	427,2	502,7	578,0	639,0	691,3
175	272,1	382,2	463,0	535,2	595,4	649,0
200	244,8	345,6	430,2	499,2	558,1	612,3
225	222,3	315,2	395,0	468,6	525,9	580,3
250	203,4	289,6	364,6	442,2	497,8	552,0
275	187,4	267,7	338,4	416,5	473,1	526,9
300	173,7	248,9	315,7	390,3	451,2	504,6
325	161,8	232,5	295,7	367,1	431,7	484,5
350	151,4	218,1	278,2	346,5	410,0	462,4
375	142,3	205,3	262,5	328,0	389,5	440,5
400	134,1	194,0	248,5	311,4	370,9	420,6
425	126,9	183,8	235,9	296,4	353,9	402,4
450	120,3	174,6	224,5	282,7	338,5	385,7
475	114,5	166,3	214,1	270,3	324,3	370,2
500	109,1	158,7	204,7	258,8	311,2	356,0

Таблица Б.10 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-250 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	1739,8	1739,8	1739,8	1739,8	1739,8	1739,8
25	796,9	1181,4	1302,5	1286,3	1440,7	1474,5
50	545,3	885,8	1022,6	989,4	1218,8	1272,9
75	379,8	662,6	804,9	786,6	1042,9	1112,8
100	310,4	570,5	692,7	666,6	916,6	990,5
125	261,4	503,7	610,9	581,7	817,1	893,1
150	225,2	453,0	548,6	518,5	736,9	814,9
175	197,5	408,8	499,6	469,8	670,7	750,4
200	175,7	367,2	460,0	431,1	615,3	696,4
225	158,1	333,0	427,2	391,0	568,1	650,5
250	143,6	304,5	391,6	357,0	527,5	611,1
275	131,5	280,5	361,5	328,4	492,2	576,9
300	121,2	259,8	335,5	304,0	461,2	547,0
325	112,4	242,0	313,0	283,0	433,8	520,5
350	104,8	226,4	293,3	264,7	409,3	497,0
375	98,2	212,6	275,9	248,5	387,4	475,9
400	92,3	200,5	260,4	234,3	367,7	457,0
425	87,1	189,6	246,6	221,5	349,8	439,8
450	82,4	179,8	234,1	210,1	333,6	423,1
475	78,2	171,0	222,9	199,8	318,7	404,5
500	74,4	163,0	212,6	190,4	305,1	387,5

Таблица Б.11 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-400 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	2609,3	2609,3	2609,3	2609,3	2609,3	2609,3
25	1021,9	1418,2	1666,0	1852,3	1969,7	2042,4
50	732,5	1003,7	1216,9	1414,6	1562,4	1664,1
75	495,2	701,7	891,3	1097,8	1267,0	1388,5
100	435,5	600,8	754,3	927,1	1081,5	1198,8
125	376,9	527,3	656,8	806,1	943,6	1054,9
150	329,1	471,6	584,0	715,6	839,7	942,1
175	291,1	428,1	527,5	645,3	758,3	853,3
200	260,4	382,9	482,6	589,2	692,9	781,4
225	235,3	346,0	446,0	543,4	639,1	721,8
250	214,4	315,4	411,9	505,3	594,2	671,8
275	196,8	289,7	378,7	473,2	556,2	629,1
300	181,8	267,7	350,3	445,8	523,5	592,3
325	168,8	248,8	325,8	420,2	495,2	560,3
350	157,6	232,4	304,5	393,2	470,4	532,2
375	147,7	217,9	285,8	369,5	448,5	507,2
400	139,0	205,1	269,2	348,4	429,0	485,0
425	131,2	193,8	254,4	329,6	406,6	465,1
450	124,2	183,6	241,2	312,7	386,2	447,1
475	118,0	174,4	229,2	297,4	367,7	430,8
500	112,3	166,0	218,4	283,5	350,9	412,3

Таблица Б.12 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-630 (Y/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	3653,7	3653,7	3653,7	3653,7	3653,7	3653,7
25	1032,9	1620,3	1933,1	2261,5	2477,4	2610,5
50	755,7	1121,7	1348,6	1627,7	1851,1	2010,5
75	498,6	775,7	939,7	1200,6	1432,2	1608,3
100	440,6	669,2	790,6	1000,2	1198,2	1356,5
125	383,0	574,9	684,3	859,0	1030,4	1173,5
150	334,3	498,8	605,3	755,7	904,9	1034,5
175	295,5	439,4	544,4	676,7	809,4	925,5
200	264,1	392,1	496,2	614,4	733,9	839,7
225	238,3	353,6	457,2	564,0	672,8	769,9
250	217,0	321,8	424,1	522,5	622,3	712,1
275	199,0	295,1	389,0	487,8	580,0	663,4
300	183,7	272,4	359,1	458,2	543,9	621,8
325	170,5	252,8	333,4	432,8	512,9	585,9
350	159,0	235,9	311,2	405,5	485,9	554,6
375	149,0	221,0	291,6	380,3	462,2	527,1
400	140,1	207,9	274,4	358,0	441,2	502,7
425	132,2	196,2	259,0	338,1	420,8	481,0
450	125,1	185,8	245,3	320,3	398,9	461,4
475	118,8	176,4	233,0	304,3	379,2	443,8
500	113,0	167,8	221,8	289,8	361,3	427,7

Таблица Б.13 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-160 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	3443,1	3443,1	3443,1	3443,1	3443,1	3443,1
25	1029,3	1509,6	1861,2	2156,6	2353,7	2478,3
50	747,4	1052,0	1310,0	1569,5	1777,0	1926,2
75	497,1	713,8	924,7	1171,4	1388,5	1553,4
100	438,6	611,6	779,0	978,4	1166,7	1316,6
125	380,6	536,0	675,4	843,4	1006,7	1143,2
150	332,2	478,5	598,3	743,7	886,9	1010,7
175	293,7	433,7	538,8	667,2	795,2	906,7
200	262,6	388,8	491,7	606,7	722,4	824,4
225	237,1	350,9	453,5	557,7	663,3	757,3
250	216,0	319,5	420,0	517,3	614,4	701,5
275	198,1	293,1	385,5	483,3	573,3	654,3
300	182,9	270,7	356,1	454,4	538,2	614,0
325	169,8	251,4	330,9	429,5	507,9	579,2
350	158,4	234,6	308,9	401,7	481,5	548,7
375	148,5	219,9	289,7	376,9	458,3	521,9
400	139,6	206,9	272,6	355,0	437,7	498,0
425	131,8	195,3	257,5	335,5	416,7	476,8
450	124,8	184,9	243,9	318,0	395,3	457,6
475	118,4	175,6	231,7	302,2	375,9	440,3
500	112,7	167,2	220,6	287,9	358,3	423,6

Таблица Б.14 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-250 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	4875,2	4875,2	4875,2	4875,2	4875,2	4875,2
25	1022,6	1576,5	2053,3	2515,6	2853,6	3074,3
50	762,5	1100,9	1408,5	1743,9	2032,7	2251,0
75	499,0	725,4	957,2	1247,0	1521,3	1742,7
100	442,0	623,0	804,9	1033,7	1259,4	1448,6
125	384,9	545,5	695,4	883,3	1075,0	1240,5
150	336,0	486,2	613,8	774,0	938,1	1085,4
175	296,8	440,0	551,2	690,9	834,9	964,8
200	265,2	395,5	501,7	625,7	754,2	870,9
225	239,3	356,4	461,7	573,2	689,3	795,3
250	217,8	324,1	429,0	530,2	636,0	733,1
275	199,7	297,1	393,1	494,2	591,4	681,1
300	184,3	274,1	362,6	463,7	553,7	636,9
325	171,0	254,3	336,5	437,5	521,3	599,0
350	159,5	237,1	313,8	410,8	493,2	566,0
375	149,4	222,1	293,9	384,9	468,6	537,1
400	140,4	208,9	276,4	362,1	446,8	511,6
425	132,5	197,1	260,9	341,8	427,3	488,9
450	125,4	186,5	246,9	323,6	404,8	468,5
475	119,0	177,1	234,4	307,3	384,5	450,2
500	113,2	168,5	223,1	292,5	366,2	433,6

Таблица Б.15 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-400 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	7204,6	7204,6	7204,6	7204,6	7204,6	7204,6
25	1006,7	1592,3	2158,2	2790,8	3318,5	3692,0
50	771,3	1131,5	1475,5	1876,4	2247,2	2544,4
75	499,8	731,5	976,6	1297,5	1620,5	1896,9
100	444,1	630,1	821,8	1071,9	1328,7	1553,6
125	387,7	551,7	708,8	911,5	1125,7	1316,5
150	338,4	491,3	624,4	795,5	976,1	1142,8
175	298,9	444,1	559,6	707,6	864,3	1010,1
200	266,9	399,9	508,5	639,1	777,4	906,1
225	240,7	360,1	467,3	584,1	708,1	823,8
250	219,0	327,2	433,4	539,2	651,5	756,7
275	200,7	299,7	398,2	501,8	604,5	700,9
300	185,2	276,3	367,0	470,2	564,8	653,8
325	171,8	256,3	340,3	443,1	530,9	613,5
350	160,1	238,9	317,1	417,2	501,5	578,6
375	150,0	223,6	296,9	390,5	475,9	548,2
400	141,0	210,2	279,0	367,0	453,3	521,4
425	133,0	198,3	263,2	346,2	433,3	497,6
450	125,8	187,6	249,0	327,6	411,6	476,4
475	119,4	178,0	236,3	310,9	390,6	457,3
500	113,6	169,4	224,8	295,8	371,7	440,0

Таблица Б.16 – Результаты расчёта минимального тока однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-630 (Δ/Y_H), А

Длина линии, м	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²					
	16	25	35	50	70	95
0	8851,7	8851,7	8851,7	8851,7	8851,7	8851,7
25	997,7	1591,6	2190,9	2902,3	3535,2	4003,2
50	775,3	1144,7	1504,5	1934,9	2345,0	2682,1
75	500,1	734,1	984,6	1318,8	1663,5	1965,3
100	445,1	633,3	829,2	1088,5	1359,0	1600,0
125	389,0	554,5	714,8	924,0	1148,0	1349,8
150	339,5	493,7	629,2	805,0	993,5	1167,9
175	299,9	446,0	563,4	715,1	877,1	1029,7
200	267,7	402,0	511,6	645,0	787,6	921,4
225	241,4	361,8	469,8	589,0	716,3	836,2
250	219,6	328,7	435,6	543,2	658,3	766,8
275	201,2	300,9	400,5	505,2	610,2	709,4
300	185,6	277,4	369,0	473,0	569,7	661,0
325	172,1	257,2	342,0	445,6	535,1	619,7
350	160,5	239,7	318,6	420,0	505,2	584,0
375	150,2	224,3	298,2	393,0	479,1	552,9
400	141,2	210,8	280,2	369,2	456,1	525,6
425	133,2	198,8	264,2	348,1	435,8	501,3
450	126,0	188,1	249,9	329,3	414,5	479,7
475	119,6	178,5	237,1	312,4	393,2	460,3
500	113,8	169,8	225,6	297,2	374,1	442,7

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчётные кривые тока минимального однофазного короткого замыкания

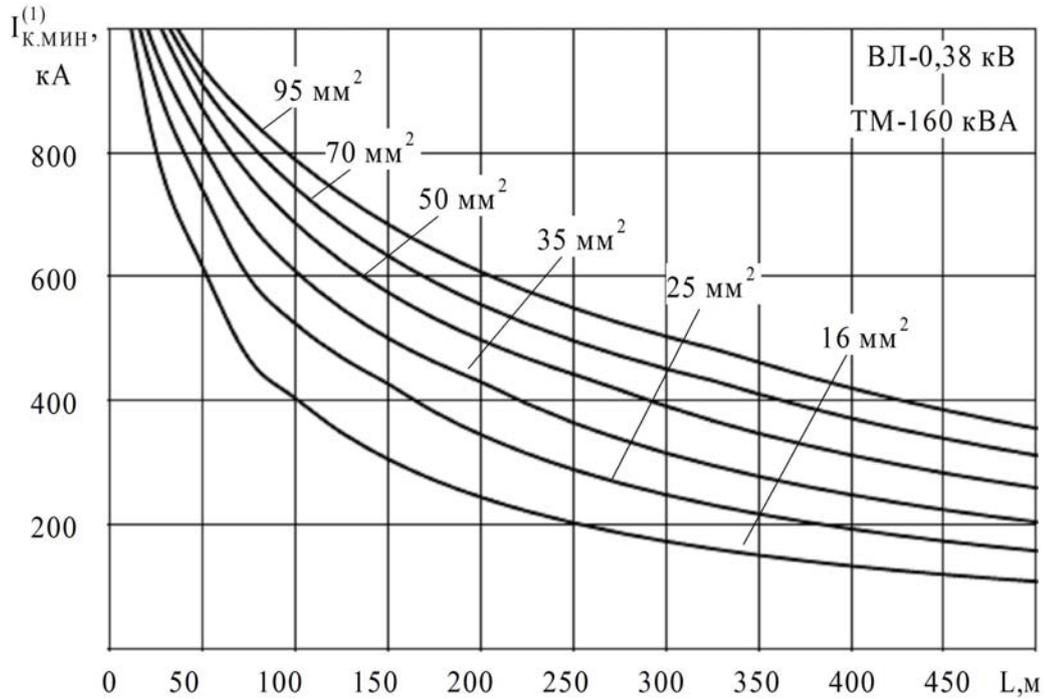


Рисунок В.1. – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-160 кВА (Y/Y_H)

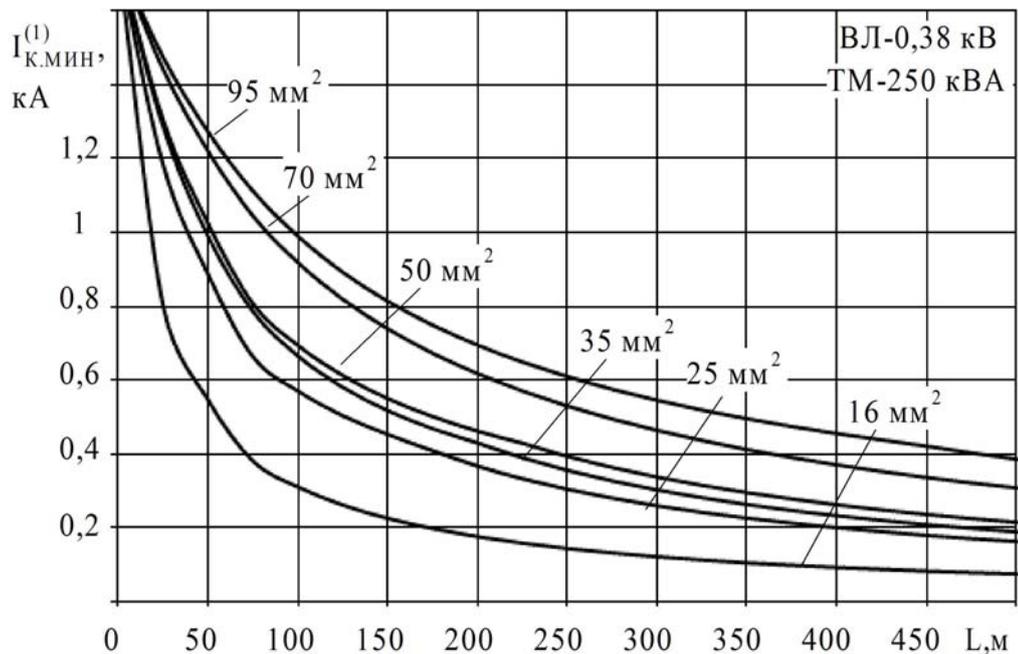


Рисунок В.2. – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-250 кВА (Y/Y_H)

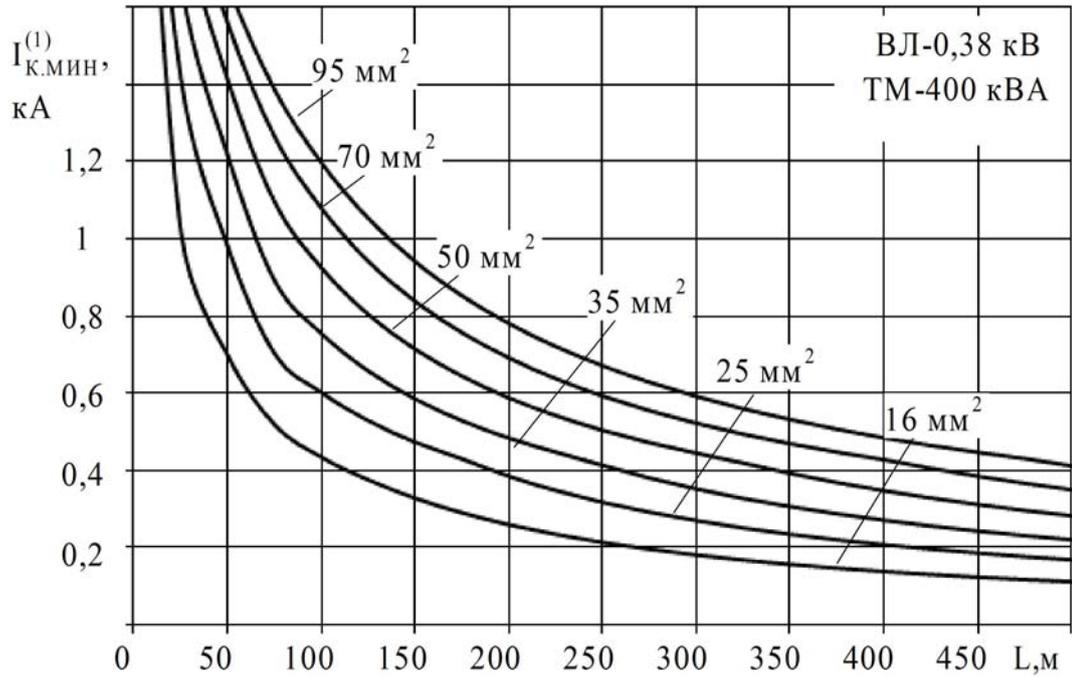


Рисунок В.3. – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-400 кВА (Y/Y_H)

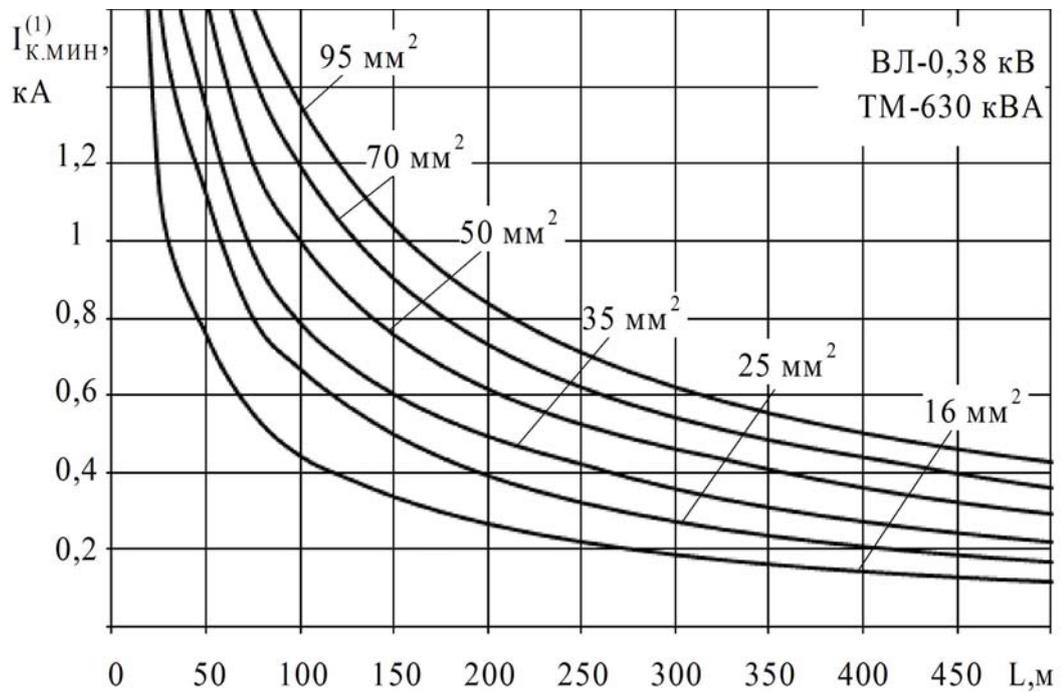


Рисунок В.4. – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-630 кВА (Y/Y_H)

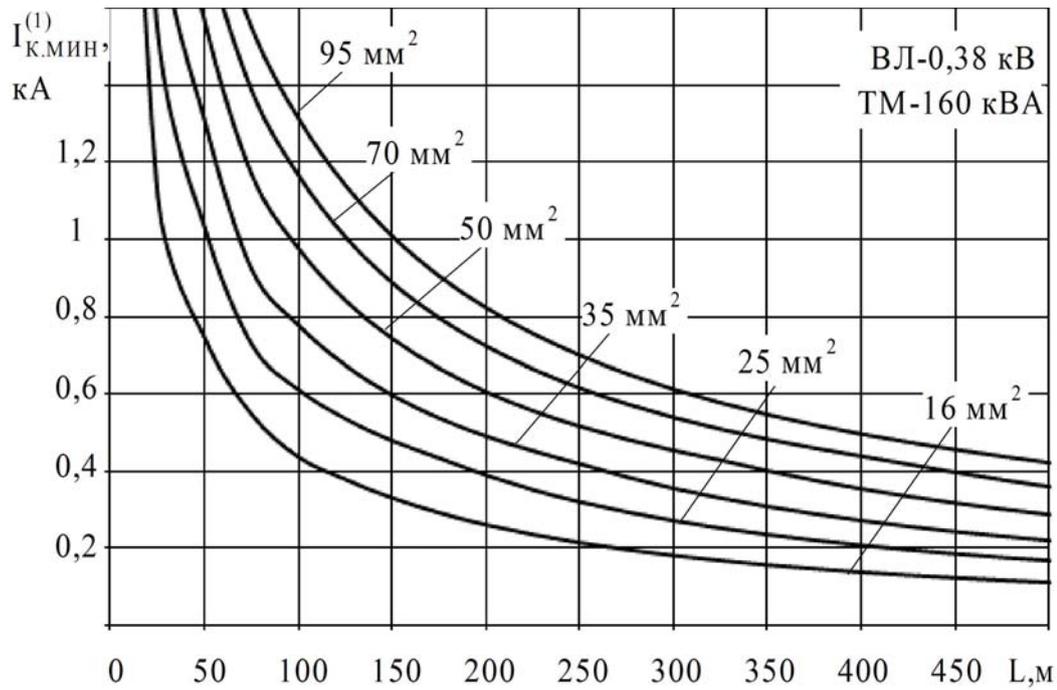


Рисунок В.5 – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-160 кВА (Δ/Y_H)

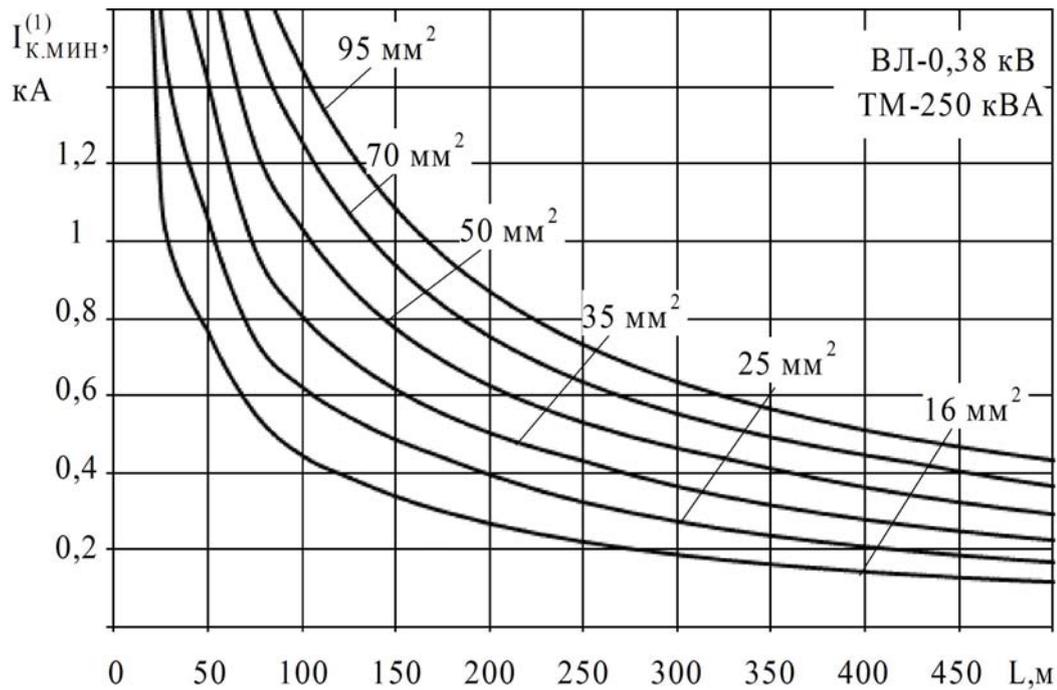


Рисунок В.6 – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-250 кВА (Δ/Y_H)

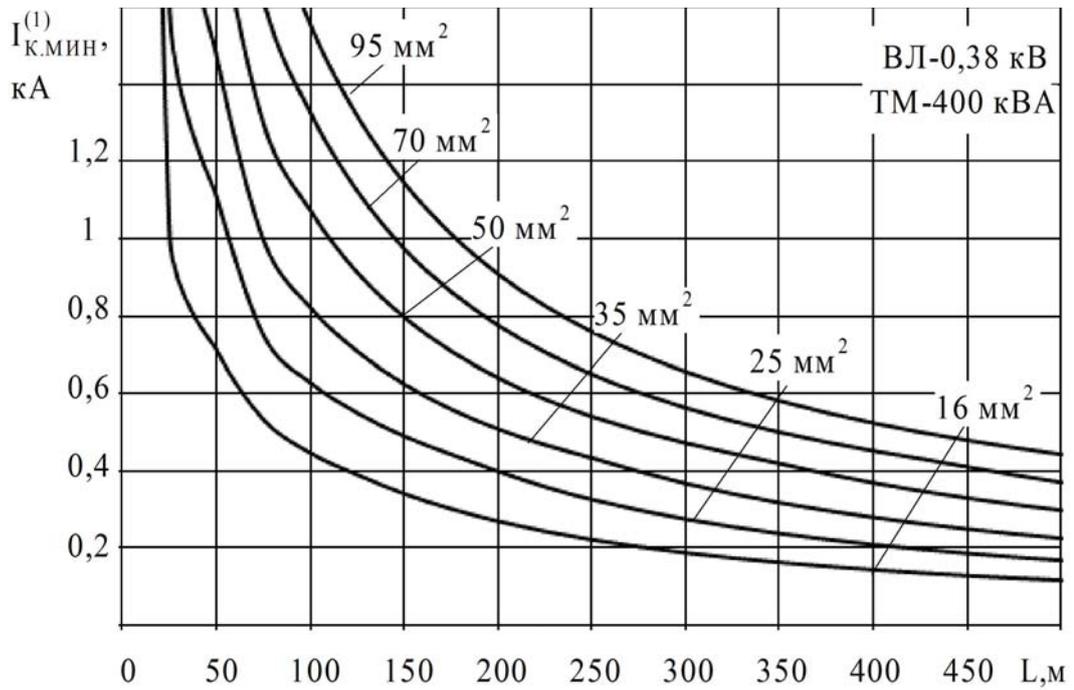


Рисунок В.7 – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-400 кВА (Δ/Y_H)

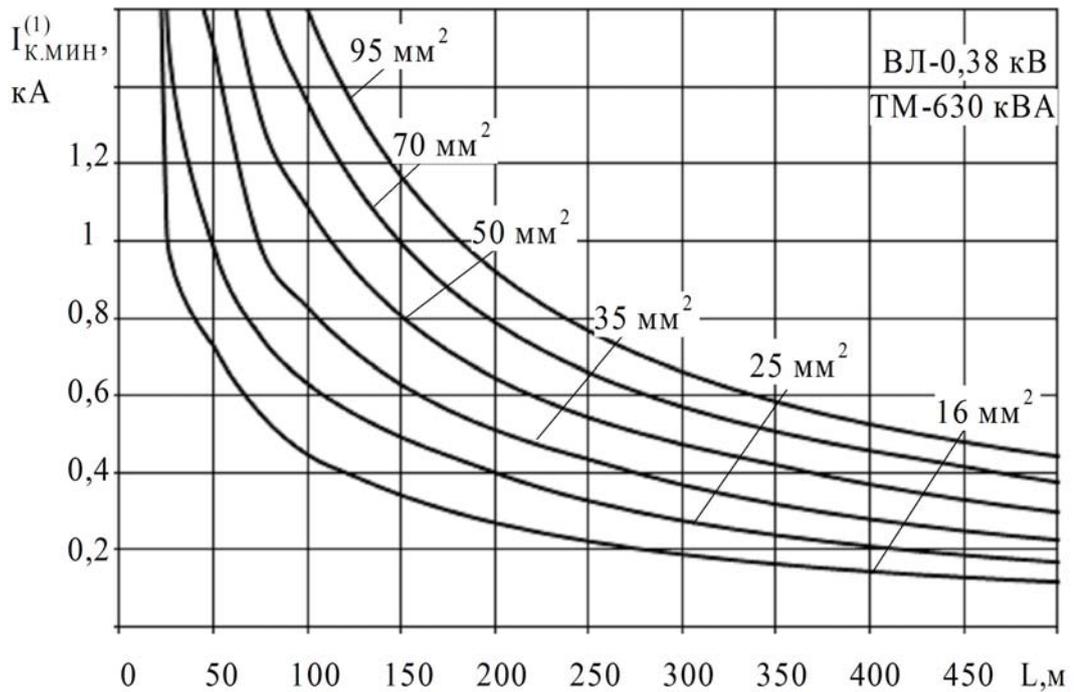


Рисунок В.8 – Расчетные кривые минимального однофазного короткого замыкания для трансформатора ТМ-630 кВА (Δ/Y_H)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем типа ППН в функции мощности трансформатора для разных сечений проводов

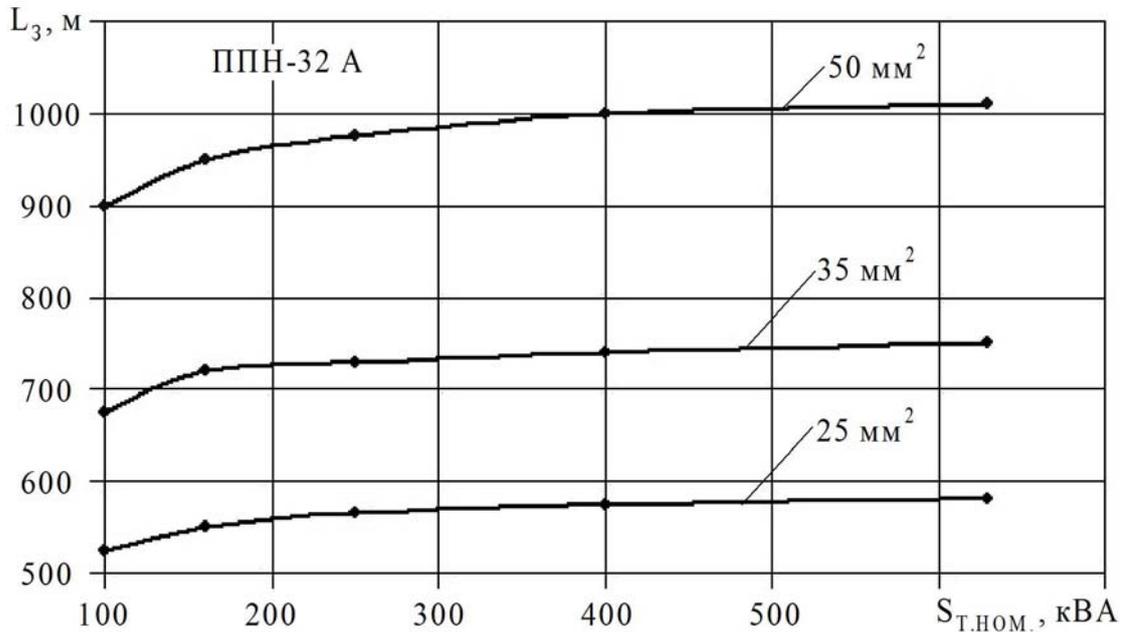


Рисунок Г.1 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-32 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S.F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{T.НОМ})$ для разных сечений проводов

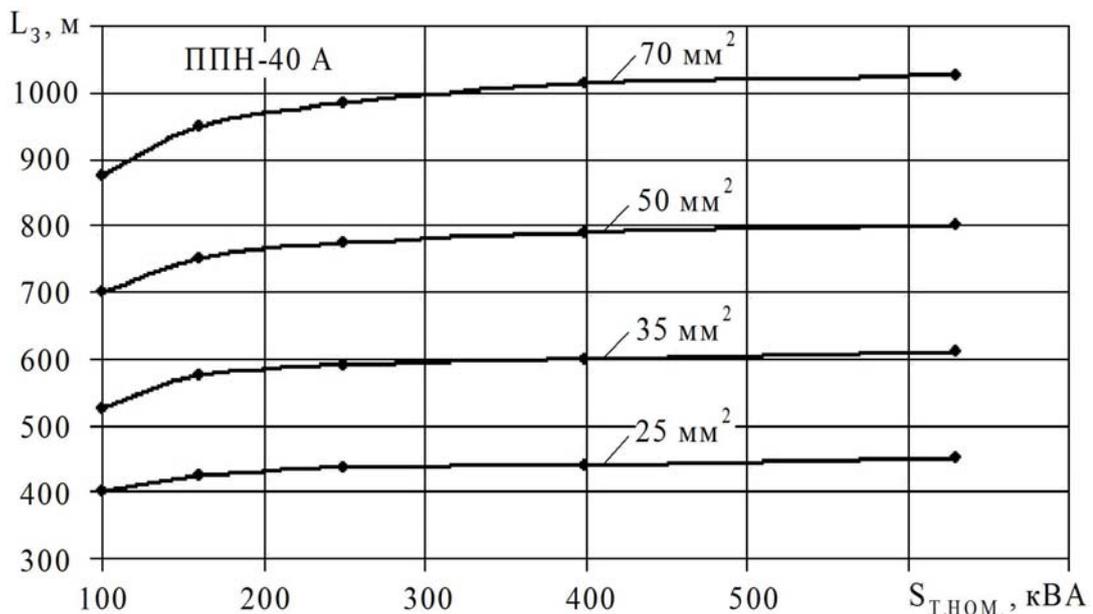


Рисунок Г.2 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-40 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S.F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{T.НОМ})$ для разных сечений проводов

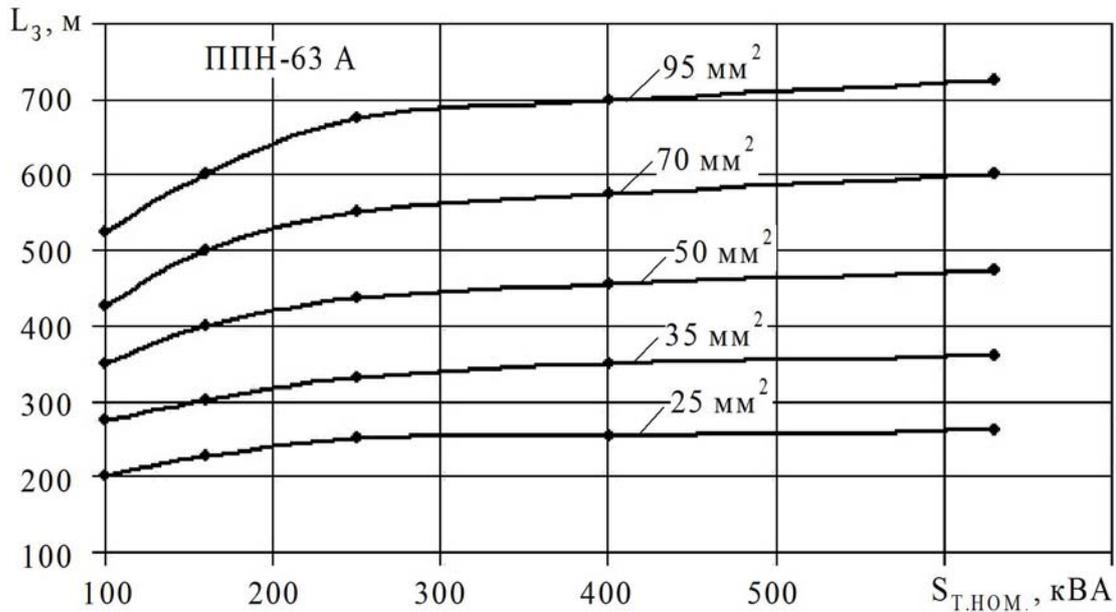


Рисунок Г.3 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-63 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S,F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{Т.НОМ})$ для разных сечений проводов

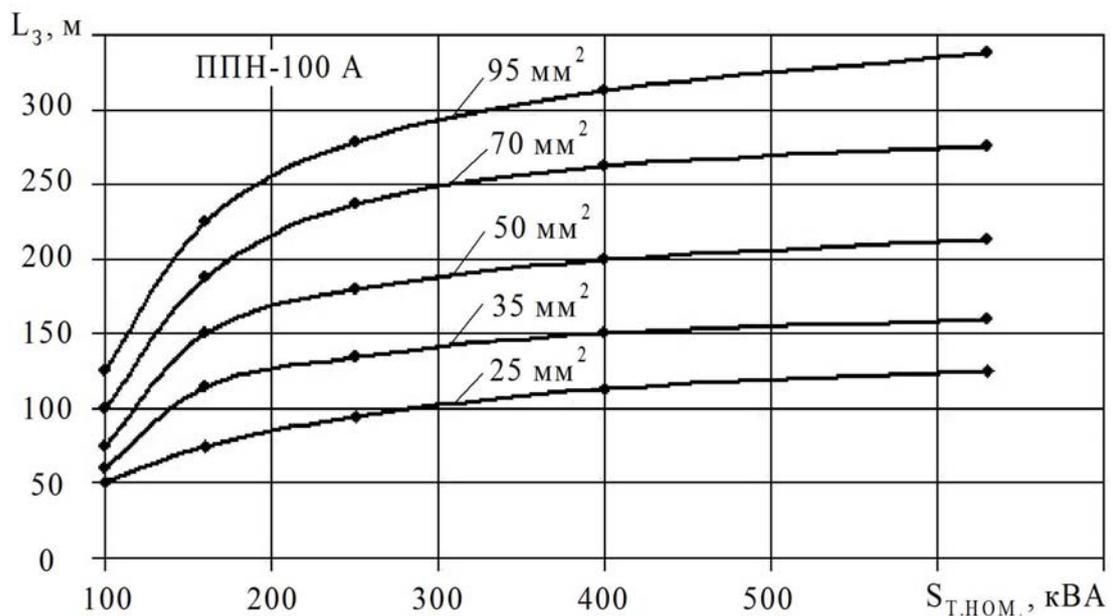


Рисунок Г.4 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-100 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S,F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{Т.НОМ})$ для разных сечений проводов

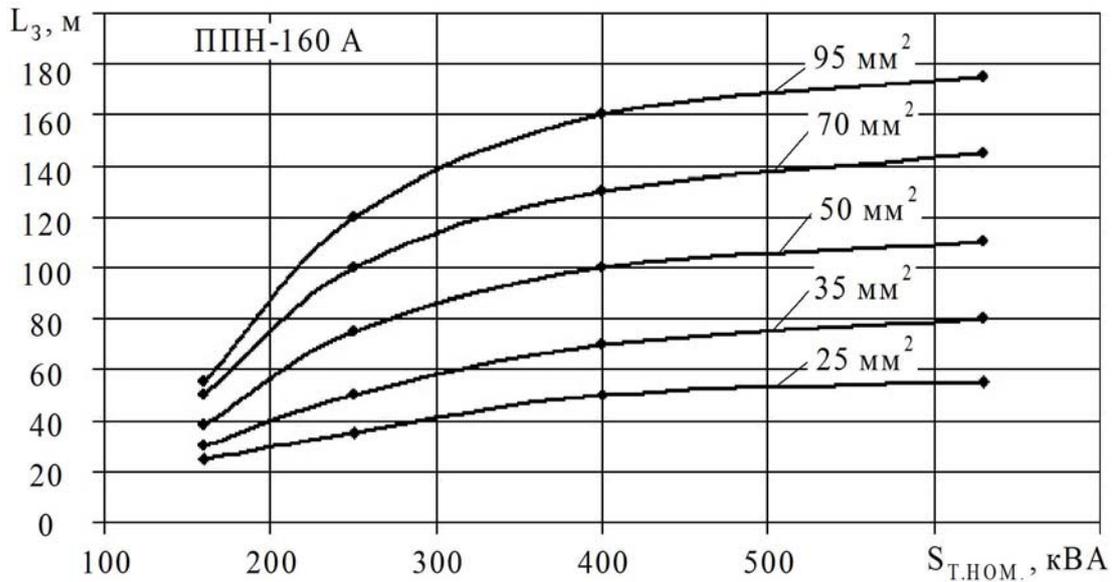


Рисунок Г.5 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-160 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S,F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{T.NOM})$ для разных сечений проводов

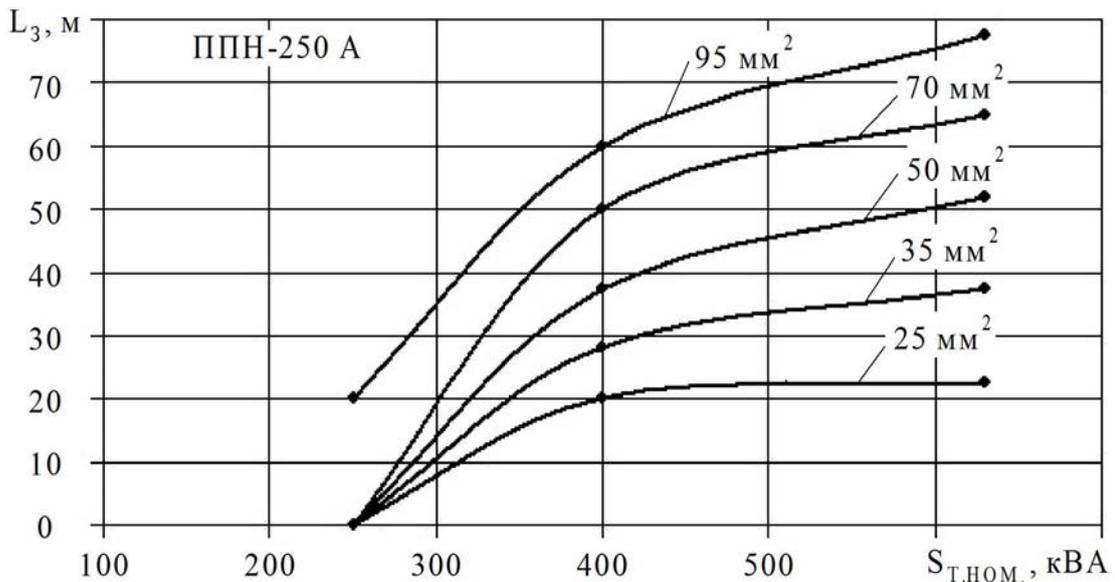


Рисунок Г.6 – Зависимости предельной длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-250 А, обеспечивающей время срабатывания $t_{S,F} = 5$ с, в функции мощности трансформатора $L_3 = f(S_{T.NOM})$ для разных сечений проводов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем типа ППН
в зависимости от сечений проводов воздушной линии для разной мощности
силовых трансформаторов

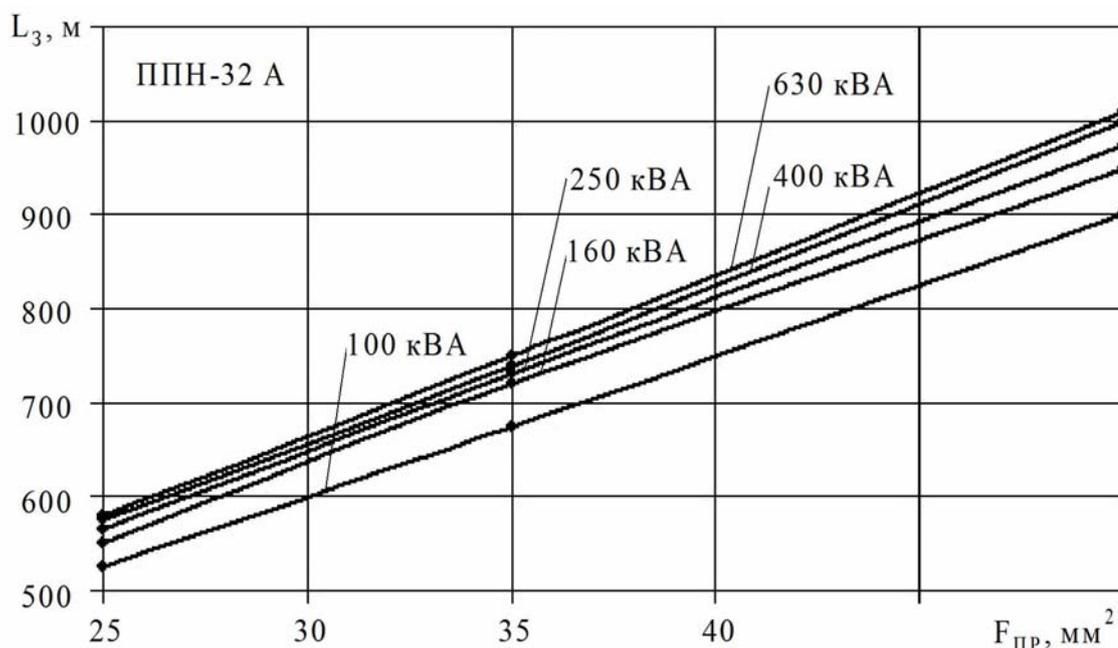


Рисунок Д.1 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-32 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{ПР})$ для разной мощности силовых трансформаторов

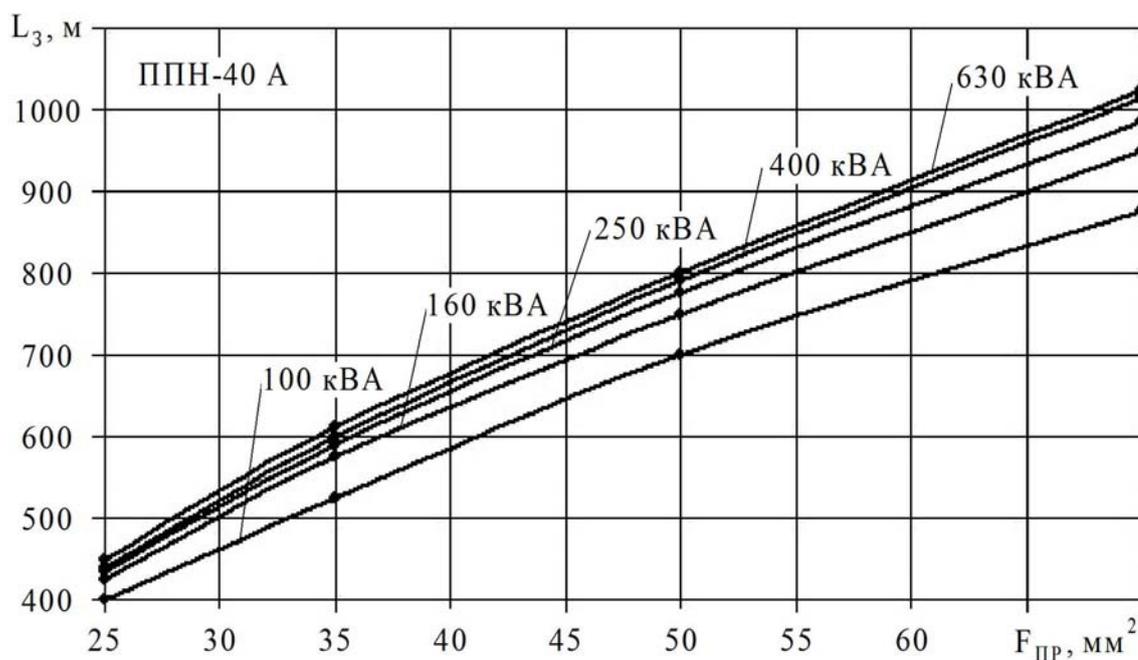


Рисунок Д.2 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-40 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{ПР})$ для разной мощности силовых трансформаторов

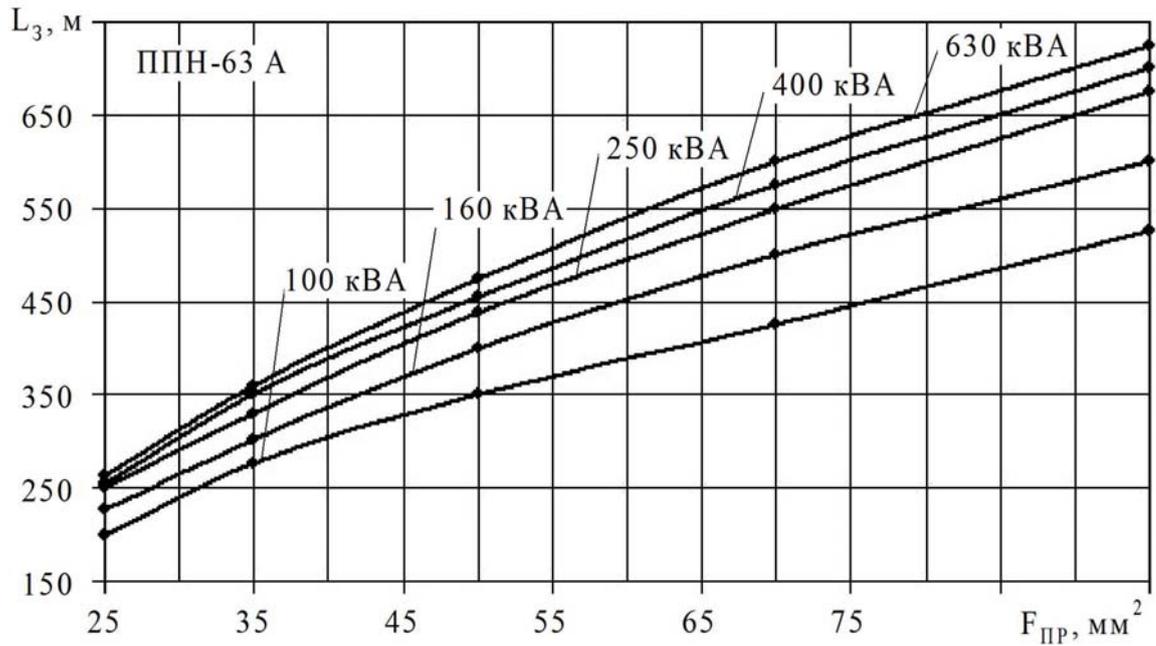


Рисунок Д.3 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-63 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{ПР})$ для разной мощности силовых трансформаторов

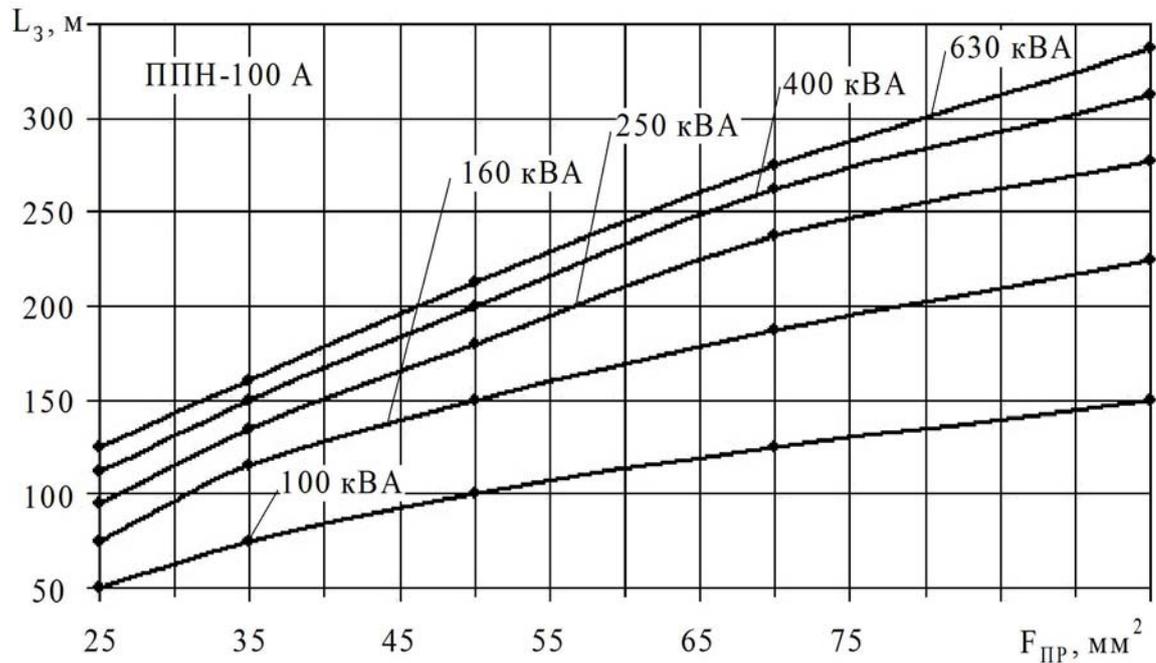


Рисунок Д.4 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-100 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{ПР})$ для разной мощности силовых трансформаторов

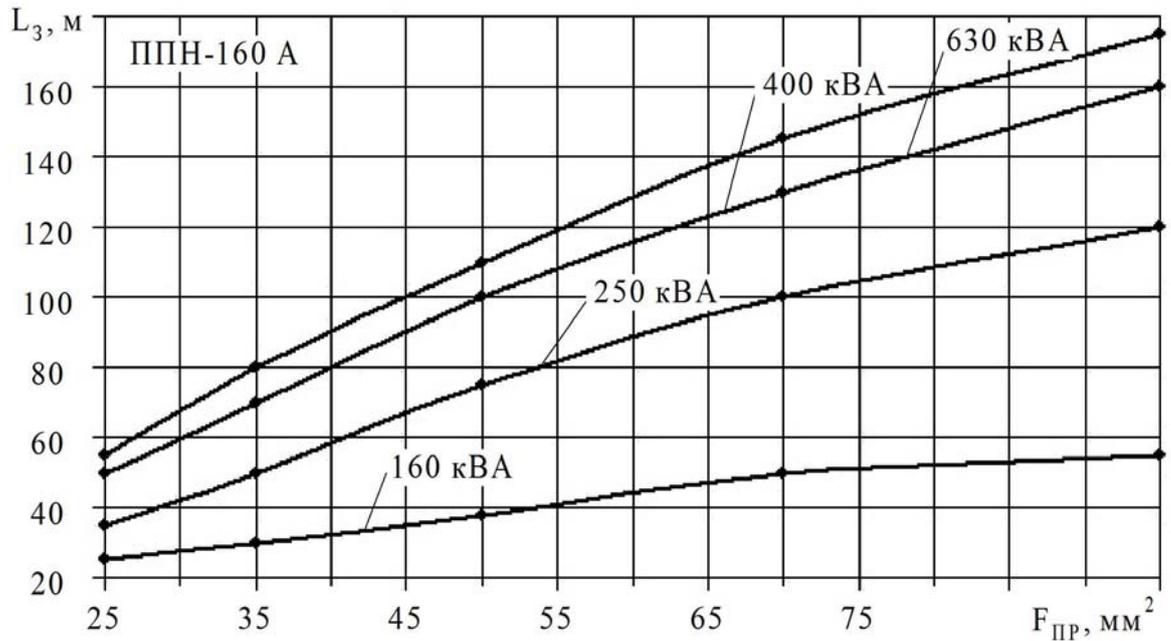


Рисунок Д.5 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-160 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{PP})$ для разной мощности силовых трансформаторов

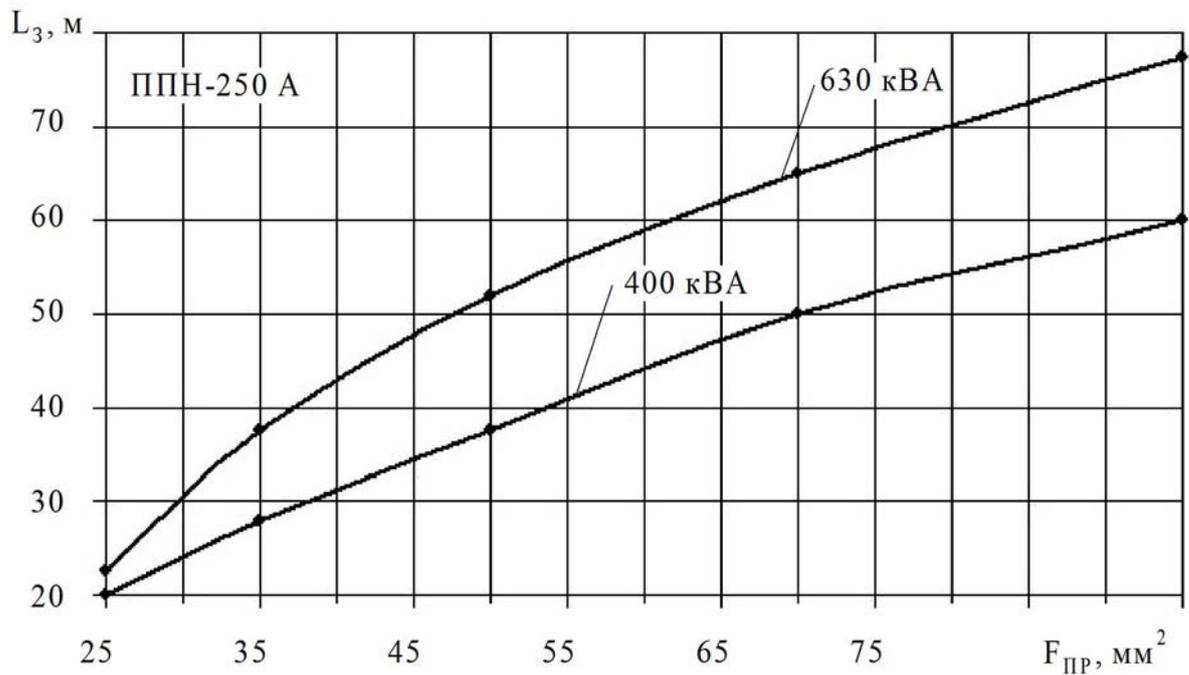


Рисунок Д.6 – Предельные длины зоны защиты воздушной линии предохранителем ППН-250 А в зависимости от сечений проводов воздушной линии $L_3 = f(F_{PP})$ для разной мощности силовых трансформаторов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Расчётные зоны защиты секционирующих аппаратов

Таблица Е.1 – Расчёт зоны защиты секционирующих аппаратов (для ВЛ 380 В с проводами марки АС-4х25)

S _{ГЛ} , кВА	I _{ГЛ} в начале ВЛ, А	250 А			160 А			100 А			63 А			40 А		
		I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ЧМ} мин, о.е.	L, м	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ЧМ} мин, о.е.	L, м	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ЧМ} мин, о.е.	L, м	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ЧМ} мин, о.е.	L, м	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ЧМ} мин, о.е.	L, м
630	250	1584	6,3	22,5	915,2	5,7	55	579,6	5,8	125	305	4,8	263	181,3	4,5	450
	160	-	-	-	915,2	5,7	55	579,6	5,8	125	305	4,8	263	181,3	4,5	450
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,8	125	305	4,8	263	181,3	4,5	450
400	250	1584	6,3	20	915,2	5,7	50	579,6	5,8	112,5	305	4,8	255	181,3	4,5	440
	160	-	-	-	915,2	5,7	50	579,6	5,8	112,5	305	4,8	255	181,3	4,5	440
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,8	112,5	305	4,8	255	181,3	4,5	440
250	250	1584	6,3	0	915,2	5,7	35	579,6	5,8	95	305	4,8	250	181,3	4,5	435
	160	-	-	-	915,2	5,7	35	579,6	5,8	95	305	4,8	250	181,3	4,5	435
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,8	95	305	4,8	250	181,3	4,5	435
160	160	-	-	-	915,2	5,7	25	579,6	5,8	75	305	4,8	228	181,3	4,5	425
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,8	75	305	4,8	228	181,3	4,5	425
	160	-	-	-	915,2	5,7	0	579,6	5,8	50	305	4,8	200	181,3	4,5	400
100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,8	50	305	4,8	200	181,3	4,5	400	

Таблица Е.2 – Расчёт зоны защиты секционирующих аппаратов (для ВЛ 380 В с проводами марки АС-4х35)

Ст.н., кВА	I _{Ф.Н.В} в начале ВЛ, А	250 А			160 А			100 А			63 А			40 А		
		I _{КМ.М.И.Н.} ⁽¹⁾ А	К _{Ч.М.И.Н.} о.е.	L, М	I _{КМ.М.И.Н.} ⁽¹⁾ А	К _{Ч.М.И.Н.} о.е.	L, М	I _{КМ.М.И.Н.} ⁽¹⁾ А	К _{Ч.М.И.Н.} о.е.	L, М	I _{КМ.М.И.Н.} ⁽¹⁾ А	К _{Ч.М.И.Н.} о.е.	L, М	I _{КМ.М.И.Н.} ⁽¹⁾ А	К _{Ч.М.И.Н.} о.е.	L, М
630	250	1584	6,3	37,4	915,2	5,7	80	579,6	5,7	160	304,8	4,8	360	181,3	4,5	612,5
	160	-	-	-	915,2	5,7	80	579,6	5,7	160	304,8	4,8	360	181,3	4,5	612,5
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	160	304,8	4,8	360	181,3	4,5	612,5
400	250	1584	6,3	28	915,2	5,7	70	579,6	5,7	150	304,8	4,8	350	181,3	4,5	600
	160	-	-	-	915,2	5,7	70	579,6	5,7	150	304,8	4,8	350	181,3	4,5	600
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	150	304,8	4,8	350	181,3	4,5	600
250	250	1584	6,3	0	915,2	5,7	50	579,6	5,7	135	304,8	4,8	330	181,3	4,5	590
	160	-	-	-	915,2	5,7	50	579,6	5,7	135	304,8	4,8	330	181,3	4,5	590
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	135	304,8	4,8	330	181,3	4,5	590
160	160	-	-	-	915,2	5,7	30	579,6	5,7	115	304,8	4,8	302,5	181,3	4,5	575
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	115	304,8	4,8	302,5	181,3	4,5	575
	160	-	-	-	915,2	5,7	0	579,6	5,7	60	304,8	4,8	275	181,3	4,5	525
100	160	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	60	304,8	4,8	275	181,3	4,5	525
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	60	304,8	4,8	275	181,3	4,5	525

Таблица Е.3 – Расчёт зоны защиты секционирующих аппаратов (для ВЛ 380 В с проводами марки АС-4х50)

S _{ГН} , кВА	I _{ГН В} начале ВЛ, А	250 А			160 А			100 А			63 А			40 А		
		I _{КМ} ⁽¹⁾ А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М
630	250	1584	6,3	52,0	915,2	5,7	110	579,6	5,7	212,5	304,8	4,8	475,0	181,3	4,5	800
	160	-	-	-	915,2	5,7	110	579,6	5,7	212,5	304,8	4,8	475,0	181,3	4,5	800
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	212,5	304,8	4,8	475,0	181,3	4,5	800
400	250	1584	6,3	37,5	915,2	5,7	100	579,6	5,7	200	304,8	4,8	455,0	181,3	4,5	790
	160	-	-	-	915,2	5,7	100	579,6	5,7	200	304,8	4,8	455,0	181,3	4,5	790
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	200	304,8	4,8	455,0	181,3	4,5	790
250	250	1584	6,3	0	915,2	5,7	75	579,6	5,7	180	304,8	4,8	437,5	181,3	4,5	775
	160	-	-	-	915,2	5,7	75	579,6	5,7	180	304,8	4,8	437,5	181,3	4,5	775
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	180	304,8	4,8	437,5	181,3	4,5	775
160	160	-	-	-	915,2	5,7	38	579,6	5,7	150	304,8	4,8	400	181,3	4,5	750
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	150	304,8	4,8	400	181,3	4,5	750
	160	-	-	-	915,2	5,7	0	579,6	5,7	75	304,8	4,8	350	181,3	4,5	700
100	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	75	304,8	4,8	350	181,3	4,5	700
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	75	304,8	4,8	350	181,3	4,5	700

Таблица Е.4 – Расчёт зоны защиты секционирующих аппаратов (для ВЛ 380 В с проводами марки АС-4х70)

S _{ГНВ} , кВА	I _{ГНВ} в начале ВЛ, А	250 А			160 А			100 А			63 А			40 А		
		I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _{ч.мин} , о.е.	L, М
630	250	1584	6,3	65	915,2	5,7	145	579,6	5,7	275	304,8	4,8	600	181,3	4,5	1025
	160	-	-	-	915,2	5,7	145	579,6	5,7	275	304,8	4,8	600	181,3	4,5	1025
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	275	304,8	4,8	600	181,3	4,5	1025
400	250	1584	6,3	50	915,2	5,7	130	579,6	5,7	262,5	304,8	4,8	575	181,3	4,5	1015
	160	-	-	-	915,2	5,7	130	579,6	5,7	262,5	304,8	4,8	575	181,3	4,5	1015
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	262,5	304,8	4,8	575	181,3	4,5	1015
250	250	1584	6,3	0	915,2	5,7	100	579,6	5,7	237,5	304,8	4,8	550	181,3	4,5	985
	160	-	-	-	915,2	5,7	100	579,6	5,7	237,5	304,8	4,8	550	181,3	4,5	985
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	237,5	304,8	4,8	550	181,3	4,5	985
160	160	-	-	-	915,2	5,7	50	579,6	5,7	187,5	304,8	4,8	500	181,3	4,5	950
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	187,5	304,8	4,8	500	181,3	4,5	950
	160	-	-	-	915,2	5,7	0	579,6	5,7	100	304,8	4,8	425	181,3	4,5	875
100	160	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	100	304,8	4,8	425	181,3	4,5	875
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	100	304,8	4,8	425	181,3	4,5	875
	160	-	-	-	915,2	5,7	0	579,6	5,7	100	304,8	4,8	425	181,3	4,5	875

Таблица Е.5 – Расчёт зоны защиты секционирующих аппаратов (для ВЛ 380 В с проводами марки АС-4х95)

S _{ГН} , кВА	I _{ГН} в начале ВЛ, А	250 А			160 А			100 А			63 А			40 А		
		I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _ч , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _ч , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _ч , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _ч , о.е.	L, М	I _{КМ} ⁽¹⁾ , А	К _ч , о.е.	L, М
630	250	1584	6,3	77,5	915,2	5,7	175,0	579,6	5,7	337,5	304,8	4,8	725	181,3	4,5	>1 км
	160	-	-	-	915,2	5,7	175	579,6	5,7	337,5	304,8	4,8	725	181,3	4,5	>1 км
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	337,5	304,8	4,8	725	181,3	4,5	>1 км
400	250	1584	6,3	60	915,2	5,7	160	579,6	5,7	312,5	304,8	4,8	700	181,3	4,5	>1 км
	160	-	-	-	915,2	5,7	160	579,6	5,7	312,5	304,8	4,8	700	181,3	4,5	>1 км
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	312,5	304,8	4,8	700	181,3	4,5	>1 км
250	250	1584	6,3	20	915,2	5,7	120	579,6	5,7	277,5	304,8	4,8	675	181,3	4,5	>1 км
	160	-	-	-	915,2	5,7	120	579,6	5,7	277,5	304,8	4,8	675	181,3	4,5	>1 км
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	277,5	304,8	4,8	675	181,3	4,5	>1 км
160	160	-	-	-	915,2	5,7	55	579,6	5,7	225	304,8	4,8	600	181,3	4,5	>1 км
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	225	304,8	4,8	600	181,3	4,5	>1 км
	160	-	-	-	915,2	5,7	0	579,6	5,7	125	304,8	4,8	525	181,3	4,5	1025
100	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	125	304,8	4,8	525	181,3	4,5	1025
	100	-	-	-	-	-	-	579,6	5,7	125	304,8	4,8	525	181,3	4,5	1025

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет» (НИУ)

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель главного инженера
филиала ОАО «МРСК Урала»
– «Челябэнерго»

С.Д. Ваулин
«27» *август* 2013 г.

В.А. Болотин
«20» *октябрь* 2013 г.



АКТ
проведения испытаний защиты от однофазных коротких замыканий
воздушной линии напряжением 380 В на полигоне
филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

8 октября 2013 г.

Испытания проведены 27 августа и 8 октября 2013 года на воздушной линии напряжением 380 В, построенной на полигоне филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго».

Защита воздушной линии напряжением 380 В (ВЛ-0,38 кВ) выполнена путем ее секционирования на участки, в начале которых установлены защитные аппараты, в качестве которых использованы автоматический выключатель типа ВА04-36 с номинальным током 100 А и плавкие предохранители типа ПН2 с номинальными токами плавких вставок 63 и 40 А.

Расчёт параметров защитных аппаратов и их расстановка произведёны таким образом, чтобы в конце зоны защиты каждого из этих аппаратов согласно п. 1.7.82 «Правил устройства электроустановок» 7-го издания время срабатывания не превышало 5 с.

Расчёт параметров защиты произведён согласно методике, разработанной на кафедрах «Системы электроснабжения» и «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета.

На рис. 1 приведена принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В, а на рис. 2 – план расположения воздушной линии напряжением 380 В на полигоне «Челябэнерго» с расстановкой средств защиты при проведении испытаний.

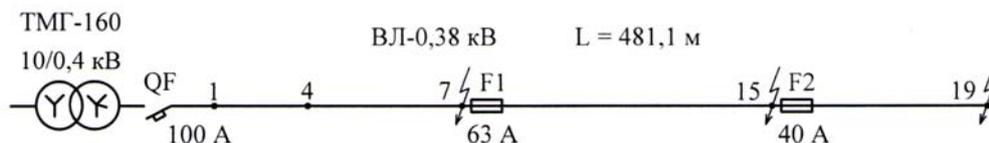


Рис. 1. Принципиальная схема расстановки средств защиты электрической сети напряжением 380 В

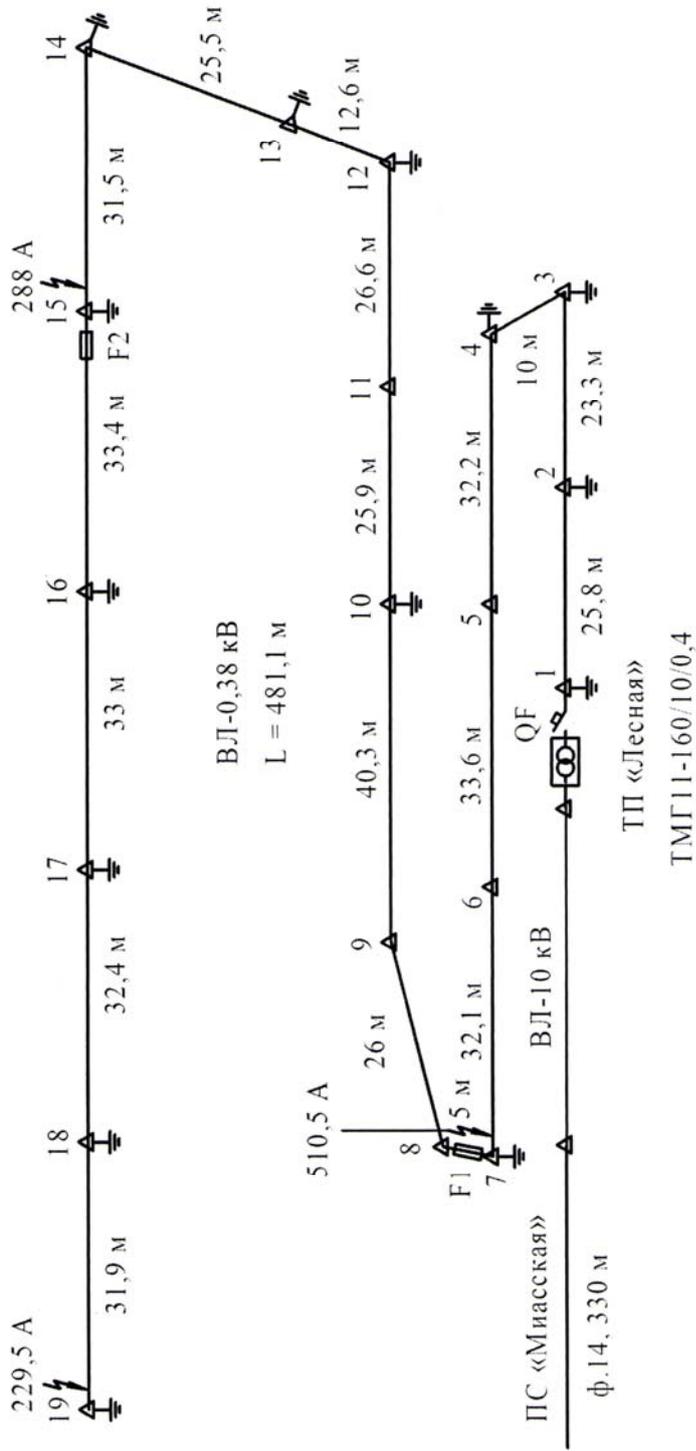


Рис. 2. План расположения воздушной линии напряжением 380 В на полигоне «Челябэнерго» с расстановкой средств защиты при проведении испытаний

Общая характеристика электрической сети напряжением 380 В (рис. 1):

1. Питает электрическую сеть силовой трансформатор типа ТМГ-160/10 кВ.2. Участок линии с 1-й по 4-ю опоры выполнен самонесущим изолированным проводом марки СИП2-3х35+50.

3. Участок линии с 4-й по 19-ю опоры выполнен неизолированными проводами марки АС-3х35+35.

4. Общая протяженность ВЛ-0,38 кВ составляет 481,1 м.

5. В РУ-0,4 кВ трансформаторной подстанции в качестве защитного аппарата ВЛ-0,38 кВ установлен автоматический выключатель QF типа ВА04-36 с номинальным током 100 А.

6. Дополнительно, как секционирующие аппараты, для защиты линии по её длине на расстоянии 157 м от ТП на 7-й опоре установлены плавкий предохранитель F1 типа ПН-2 с номинальным током 63 А и на расстоянии 350,4 м от ТП – плавкий предохранитель F2 типа ПН-2 с номинальным током 40 А.

Регистрации результатов замеров (токов, напряжений, времени срабатывания) производились двумя самопишущими, цифровыми, измерительными комплектами «Ресурс-UF2М» Челябинэнерго, установленными в начале линии в РУ-0,4 кВ ТП и месте создания однофазного короткого замыкания.

Первоначально была проверена возможность защиты ВЛ-0,38 кВ плавким предохранителем или автоматическим выключателем с номинальным током 100 А, установленными в начале линии. Однофазное короткое замыкание было создано в конце линии на 19-й опоре.

Результаты испытаний сведены в табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	Защитный аппарат, $I_{НОМ}$, А	Место ОКЗ, номер опоры	Замеренный среднеквадратичный ток $I_{С.к}$, А	Кратность $I_{С.к}/I_{НОМ}$	Время срабатывания защиты, с
1	ПН-2, 100 А	19	222,6	2,26	105,9, ручное откл.
2			222,2	2,22	55,4, ручное откл.
3	ВА04-36, 100 А		230	2,3	26,2, ручное откл.
4		Двухфазное КЗ на 19-й опоре	447	4,47	10,3

Проведённые испытания (1–3-й опыты) подтвердили неспособность плавких предохранителей и автоматических выключателей отключать однофазные короткие замыкания на удалённых участках воздушных линий напряжением 380 В – все замыкания были отключены вручную. Двухфазное короткое замыкание (4-й опыт) с кратностью тока 4,47 было отключено через 10,3 с.

Испытания разработанной защиты от однофазных коротких замыканий воздушной линии напряжением 380 В произведены путем создания искусственного короткого замыкания между фазным и нулевым проводами последовательно на

опорах 19, 15 и 7. При этом все аппараты защиты работали с холодного состояния.

Результаты испытаний сведены в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	Защитный аппарат, $I_{НОМ}$, А	Место ОКЗ, номер опоры	Замеренный среднеквадратичный ток $I_{С.К.}$, А	Кратность $I_{С.К.}/I_{НОМ}$	Время срабатывания защиты, с
1	F2,	19	230,82	5,77	0,54
2	ПН-2,		228,26	5,71	0,28
3	40 А		232,53	5,81	2,1
4	F1,	15	288	4,57	3,2
5	ПН-2,		288	4,57	3,06
6	63 А		288	4,57	2,42
7	QF,	7	511,735	5,11	4,9
8	ВА04-36,		509,93	5,09	4,34
9	100 А		509,2	5,09	4,1

Проведенные испытания разработанной защиты от однофазных коротких замыканий воздушной линии напряжением 380 В позволяют сделать следующий вывод:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Построение защиты воздушной линии напряжением 380 В путем её секционирования на участки позволяет обеспечить срабатывания средств защитных аппаратов в нормированное «Правилами устройства электроустановок» 7-го издания время 5 с.

Главный инженер
ПО «Центральные электрические сети»
филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

 В.А. Петров

Главный инженер Красноармейского РЭС
ПО «Центральные электрические сети»
филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

 А.П. Панов

Руководитель группы качества
электрической энергии филиала
ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

 В.Я. Кадочников

Доцент кафедры «Системы электроснабжения»
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)

 А.М. Ершов

Аспирант кафедры
«Безопасность жизнедеятельности»
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)

 Р.Г. Валеев

ПРИЛОЖЕНИЕ И



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Валеева Р.Г. на тему:
«Повышение безопасности электрических сетей напряжением 380 В
при возникновении однофазных коротких замыканий»

При выполнении научно-исследовательской работы по договору № 2013236 от 01.07.2013 г. (№ Z158600005318) между ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) и филиалом ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» на тему: «Исследование несимметричных режимов работы воздушных линий напряжением 380 В с целью выбора параметров устройств для их выявления» разработана методика расчета защиты воздушной линии напряжением 380 В от однофазного короткого замыкания. Данная методика внедрена в филиале ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» и предназначена для использования специалистами, занимающимися эксплуатацией электрических сетей и проектированием воздушных линий напряжением 380 В при выполнении технологического присоединения.

Разработанная методика дает рекомендации по расчету токов однофазного короткого замыкания с учетом эффекта «теплого спада» и сопротивления дуги в месте замыкания, выбору параметров плавких предохранителей и их расстановке по воздушной линии электропередачи напряжением 380 В с использованием устройств типа «предохранитель-выключатель-разъединитель» (ПВР-0,38).

Внедрение методики позволяет повысить: уровень электро- и пожаробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями; надежность работы электрической сети 380 В; уменьшить экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии и электротравматизма местного населения.

Начальник управления ЭТОиР
филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

В.И. Высеканец

Доцент кафедры «Системы электроснабжения»
ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)

А.М. Ершов

Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)

Р.Г. Валеев

ПРИЛОЖЕНИЕ К



АКТ

использования результатов диссертационной работы Валеева Р.Г. на тему:
«Повышение безопасности электрических сетей напряжением 380 В
при возникновении однофазных коротких замыканий»

Результаты работы использованы при реконструкции релейной защиты воздушных линий напряжением 380 В, получающих питание от КТП № 573 села Селезян Еткульского района. Были установлены 6 блоков «предохранитель-выключатель-разъединитель» типа ПВР-0,38, местоположение и параметры которых выбраны согласно разработанной методике расчета защиты воздушной линии напряжением 380 В от однофазного короткого замыкания.

Использование указанных результатов позволяет повысить: уровень электро- и пожаробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями; надежность работы электрической сети 380 В; уменьшить экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии и электротравматизма местного населения.

Результаты получены при выполнении научно-исследовательской работы по договору № 2013236 от 01.07.2013 г. (№ Z158600005318) между ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) и филиалом ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» на тему: «Исследование несимметричных режимов работы воздушных линий напряжением 380 В с целью выбора параметров устройств для их выявления».

Начальник Еткульского РЭС ПО «ЦЭС»
филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

В.В. Бабкин

Доцент кафедры «Системы электроснабжения»
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)

А.М. Ершов

Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)

Р.Г. Валеев

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
 государственный университет»
 (национальный исследовательский университет),
 доктор технических наук, профессор
 Радионов А.А.
 03/07 2014 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов
 диссертационной работы Р.Г. Валеева
 «Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях
 сельскохозяйственного назначения напряжением до 1000 В»

Результаты диссертационной работы Валеева Рустама Галимьяновича «Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях сельскохозяйственного назначения напряжением до 1000 В» внедрены в учебный процесс Южно-Уральского государственного университета, в частности:

- при изучении студентами направления «Электроэнергетика и электротехника» дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» – анализ существующих методов и средств защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий;
- при изучении студентами направления «Техносферная безопасность» дисциплины «Основы электробезопасности» – методика выбора параметров и установки средств токовых защит в электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями.

Заведующий кафедрой
 «Безопасность жизнедеятельности»
 ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ),
 доктор технических наук, профессор

 Сидоров А.И.