

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент

_____/_____/_____
« ____ » _____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующая кафедрой ЭССиСЭ

_____/_____/_____
И.М. Кирпичникова
« ____ » _____ 2019 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЗАЩИТ ВЛ-10 кВ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-13.04.02.2019.246.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР
доцент, к.т.н.

_____/_____/_____
А.М. Ершов
« ____ » _____ 2019 г.

Автор ВКР
студент группы П-285

_____/_____/_____
С.А. Валеев
« ____ » _____ 2019 г.

Нормоконтролер
Доцент, к.т.н.

_____/_____/_____
А.М. Ершов
« ____ » _____ 2019 г.

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет Энергетический
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа
«Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»

УТВЕРЖДАЮ:
Заведующая кафедрой ЭССиСЭ,
д.т.н., профессор

_____ И.М. Кирпичникова
« ____ » _____ 2019 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента
Валеева Серика Андреевича
Группа – П-185

1 Тема работы «Исследование информационных параметров при построении защит ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода»

Утверждена приказом ректора ЮУрГУ от 25 апреля 2019 г., № 899

Срок сдачи студентом законченной работы – 01.06.2019 г.

2 Исходные данные к работе – результаты проведения научно-исследовательской работы

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке

Введение

1 Анализ состояния вопроса и обоснование задач исследования

2 Методы исследования информационных параметров электрической сети при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ

3 Исследование режимов работы электрической сети напряжением 10/0,38 кВ

4 Оценка условий электробезопасности и технико-экономической эффективности при использовании системы защиты ВЛ-10 кВ от обрывов фазных проводов

5 Заключение

4 Дата выдачи задания: 7 сентября 2017 г.

Научный руководитель _____ / А.М. Ершов /

Задание принял к исполнению _____ / С.А. Валеев /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметки руководителя о выполнении
1	Введение	15.09.2018	
2	Постановка задачи	30.09.2018	
3	Анализ состояния вопроса и обоснование задач исследования	06.11.2018	
4	Методы исследования информационных параметров электрической сети при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ	10.01.2019	
5	Исследование режимов работы электрической сети напряжением 10/0,38 кВ	15.02.2019	
6	Оценка улучшения условий электробезопасности и технико- экономической эффективности при использовании системы защиты ВЛ-10 кВ от обрывов фазных проводов	14.03.2019	
7	Заключение	25.04.2019	
8	Библиографический список	07.05.2019	
9	Оформление пояснительной записки	20.05.2019	
10	Сдача готовой работы на кафедру, представление работы на рецензию	01.06.2019	

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ _____ / И.М. Кирпичникова /

Научный руководитель работы _____ / А.М. Ершов /

Магистрант _____ / С.А. Валеев/

АННОТАЦИЯ

Валеев С.А. Исследование информационных параметров при построении защит ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода. – Челябинск: ЮУрГУ, П, 2019, 109 с., 35 рис., 42 табл., библиогр. список – 66 наим., 2 приложений, слайдов ф.А4.

Ключевые слова: воздушная линия напряжением 10 кВ, информационные параметры, обрыв фазного провода, устройства защиты линии.

Объект исследования – ВЛ-10 кВ при появлении на ней обрывов фазных проводов.

Цель работы – исследование информационных параметров при построении защит ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода

Новизна выпускной квалификационной работы заключается в том, что:

1 Для определения параметров системы защиты проведены исследования изменений информационных параметров при различных режимах работы электрической сети с использованием компьютерного моделирования.

2 Дана оценка работоспособности устройства защиты, использующего в качестве информационного параметра ток I_2 или отношение токов I_2/I_1 .

Работа может представлять интерес для организаций, проектирующих системы электроснабжения и для организаций, занимающихся эксплуатацией сетей напряжением 10 кВ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	7
1.1 Электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ и режимы работы её работы .	7
1.2 Статистика аварийных ситуаций в сетях напряжением 10 кВ ПО ЦЭС	11
1.3 Опасности, возникающие при обрывах фазных проводов	14
1.4 Существующие средства защиты от обрывов фазных проводов.....	17
1.5 Актуальность защиты ВЛ 6–10 кВ при обрывах фазных проводов	25
1.6 Задачи исследования.....	28
2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА ВЛ-10 кВ	29
2.1 Изменения напряжений и токов в электрической сети 10/0,38 кВ.....	29
2.2 Исходные положения для проведения исследований	31
2.3 Разработка компьютерной модели	32
2.4 Вывод по разделу 2	38
3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,38 кВ.....	39
3.1 Описание исследуемых режимов электрической сети 10/0,38 кВ	39
3.2 Исследование изменений токов и напряжений на компьютерной модели .	42
3.3 Анализ характеристик и оценка возможности их использования для построения релейной защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода	67
3.3.1 Анализ и построение характеристик при выбранном информационном параметре I_2/ I_1	67
3.3.2 Анализ и построение характеристик при выбранном информационном параметре I_2	76
3.4 Вывод по разделу 3	85
4 ОЦЕНКА УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ВЛ-10 кВ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА	87
4.1 Оценка условий электробезопасности.....	87
4.2 Оценка технико-экономической эффективности.....	88
4.3 Выводы по разделу 4.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	93
ПРИЛОЖЕНИЯ	98
Приложение А Обзор существующих методов защиты от обрывов фазных проводов	98
Приложение Б Компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Обрыв фазных проводов в сетях 10 кВ с изолированной, компенсированной и резистивно заземленной нейтралью, согласно проведенному анализу данных статистики по длительности и количеству аварийных отключений ВЛ-10 кВ, является одним из наиболее распространенных видов повреждения в этих сетях.

При рассмотрении данного вопроса были выявлены основные причины возникновения обрывов фазных проводов, такие как:

- действие неблагоприятных климатических условий на надежную работу ВЛ;
- нарушение технических норм при строительстве и введении в эксплуатацию ВЛ;
- неправильная эксплуатация элементов ВЛ;
- нарушения при монтаже и проектировании длины пролетов, стрел провеса, высоты подвеса, габаритов провода и параметров опор воздушных линий ВЛ 10 кВ.

При возникновении обрыва фазного провода ВЛ 10 кВ, потребители, подключенные к данной сети, будут работать в неполнофазном режиме, что, в свою очередь, повлечет за собой негативные последствия при их дальнейшей работе. Также возникают электро- и пожароопасные ситуации, ставящие под угрозу жизни людей и животных.

Согласно статистическим данным по электротравматизму на установках различного рода, наибольшее количество электротравм (48,2 %) приходится на распределительные щиты, станции и пункты, закрытые распределительные устройства напряжением 10 кВ (14,5 %).

В изученных литературных источниках (статьях, монографиях, авторских свидетельствах и патентах на изобретения) предложено довольно много технических решений – устройства защиты могут устанавливаться в начале или конце защищаемой линии. В тоже время практика эксплуатации воздушных линий напряжением 10 кВ (ВЛ-10 кВ) показывает отсутствие их применения, что обусловлено, в частности, недостаточным изучением параметров (токов и напряжений) электрической сети, которые могут быть использованы в качестве исходной информации при построении защит.

На основе приведенной выше информации, обоснование, разработка и внедрение системы защиты, которая позволяет своевременно выявлять обрывы фазных проводов и принимать необходимые меры на соответствующих участках воздушных линий, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы – исследование информационных параметров при построении защит ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода.

С целью решения данной проблемы и получения надежной системы защиты были поставлены следующие задачи исследования:

- 1 Разработать компьютерную модель электрической сети 10/0,38 кВ для проведения исследований;

2 Провести теоретические (в программной среде Matlab) исследования информационных параметров, возникающих в электрической сети при обрывах фазных проводов воздушных линий напряжением 10 кВ.

3 Обосновать критерии выявления обрывов фазных проводов указанных линий.

4 Дать оценку работоспособности устройства защиты, использующие в качестве информационных параметров отношение токов I_2/I_1 и тока I_2 .

Объект исследования – воздушные линии электропередачи напряжением 10 кВ при возникновении в них обрывов фазных проводов.

Предмет исследования – получение закономерных результатов в изменении информационных параметров электрической сети при возникновении обрывов фазных проводов, которые позволят разработать защиту от указанных режимов.

Научная новизна основных положений и результатов:

1 Для определения параметров системы защиты проведены исследования изменений информационных параметров при различных режимах работы электрической сети с использованием компьютерного моделирования.

2 Дана оценка работоспособности устройства защиты, использующего отношение токов I_2/I_1 и тока I_2 .

Практическая значимость работы:

1 Получены количественные значения изменений информационных параметров при нормальной работе ВЛ-10 кВ, при обрывах фазы проводов с учетом изменения несимметрии нагрузки в электрической сети напряжением 380 В.

2 Разработан алгоритм по автоматической записи данных исследований токов и напряжений, который значительно упрощает обработку полученных результатов исследований;

3 Данные, полученные в ходе исследований, могут быть использованы для проведения дальнейших научных исследований.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ и режимы работы её работы

Электрические сети 10 кВ относятся к классу сетей среднего напряжения. Провода воздушных линий электропередач 10 кВ работают в сложных условиях: они находятся под высоким напряжением, по ним протекает электрический ток, они подвергаются также воздействию климатических и атмосферных факторов (колебаниям температуры, воздействию ветра, атмосферных осадков, и образованию на их поверхности гололеда).

Под воздействием гололеда и колебаний температуры провода деформируются (удлиняются или укорачиваются) и изменяется их тяжесть. Поэтому появляется опасность разрыва проводов и тросов в местах их дефектов.

Для исследования режимов работы электрической сети напряжением 10 кВ рассмотрим принципиальную схему (рисунок 1.1), на которой обозначены следующие элементы:

- энергосистема напряжением 110 кВ;
- силовой трансформатор напряжением 110/10 кВ;
- воздушная линия электропередач на напряжение 10 кВ;
- силовой трансформатор на напряжение 10/0,4 кВ;
- воздушная линия электропередач на напряжение 380 В;
- электрическая нагрузка (потребитель).

Сеть 110 кВ представлена в виде главной понизительной подстанции, на которой функционирует понижающий силовой трансформатор на напряжение 110/10 кВ, номинальной мощностью 16 МВ·А. На схеме показаны линейные напряжения трех фаз U_A , U_B , U_C после преобразования напряжения со 110 кВ на 10 кВ, трансформатор 110/10 кВ выполнен по схеме «звезда»/«треугольник»-11. На схеме контактные зажимы трансформатора ТДН обозначены буквами «АТ», «ВТ», «СТ». Шлейфы присоединения воздушной линии ВЛ-10 кВ обозначены «А1», «А2», «А3», здесь же мы обозначили точку обрыва фазного провода «Т1» непосредственно за силовым трансформатором ТДН 16 МВ·А. С главной понизительной подстанции 110/10 кВ электрическая энергия, посредством воздушной линии 10 кВ, распределяется по трансформаторным подстанциям (ТП). Концевые контактные шлейфы воздушной линии 10 кВ на схеме обозначены «А2», «В2», «С2», здесь вторая точка обрыва фазного провода «Т2», т.е в конце ВЛ-10 кВ, далее следуют контактные зажимы силового трансформатора 10/0,38 кВ типа «ТМГ», обычно, эти трансформаторы располагаются в закрытых трансформаторных подстанциях блочного типа, и включают в себя двухтрансформаторные подстанции, контактные зажимы ВН и НН сторон понижающего трансформатора ТМГ обозначены соответственно «АТ», «ВТ», «СТ». Именно на стороне НН понижающего трансформатора ТМГ расположена третья точка обрыва фазного провода «Т3». После преобразования электрической энергии до уровня напряжения 0,38 кВ по воздушным или кабельным линиям электрическая энергия поступает до непосредственного потребителя. Концы кабельных и воздушных линий на схеме обо-

значены «A2», «B2», «C2». В этих точках на нашей схеме обозначена четвертая точка обрыва фазного провода «Т4». Каждый потребитель имеет определенное сопротивление, поэтому на схеме оно обозначено « $R_{Н.А}$ », « $R_{Н.В}$ », « $R_{Н.С}$ ».

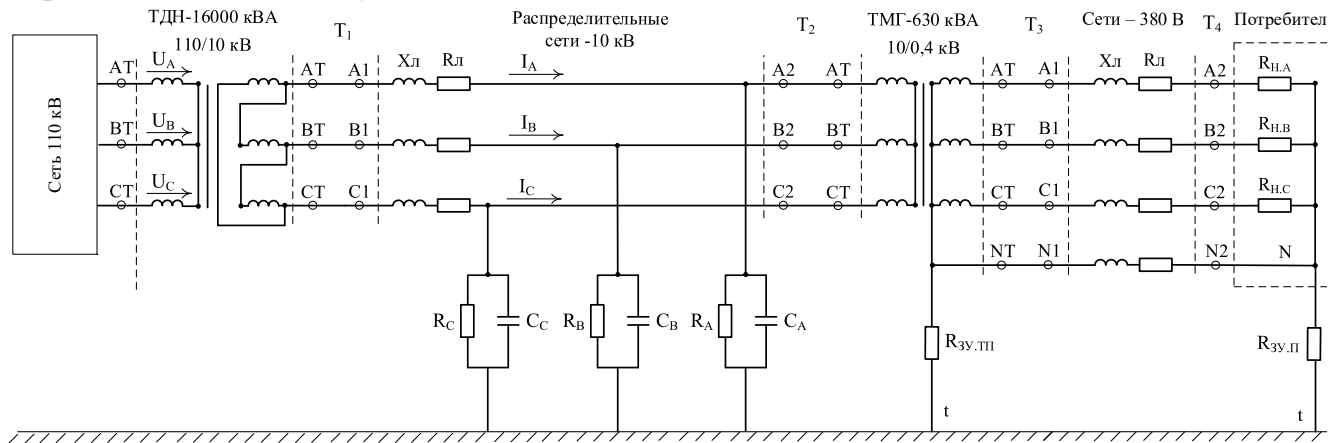


Рисунок 1.1 – Схема электрической сети напряжением 110-10-0,38 кВ

На напряжения и токи электрической сети в общем случае влияют:

- различные несимметричные режимы работы электроприёмников, искажающих симметрию трёхфазной системы напряжений относительно нулевого рабочего провода, при симметричном режиме работе самой электрической сети;
- различные сочетания обрывов фазных проводов сети 10/0,38 кВ;
- различные короткие замыкания в параллельных воздушных линиях, обрывы фазных проводов распределительных сетей с последующими замыканиями;
- симметричные повышения или понижения напряжений питающей сети вследствие возникающих в ней каких-либо возмущений – регулирование напряжения и т.д.

Сеть напряжением 10 кВ работает с изолированной нейтралью, а сеть 380 В с глухо заземлённой нейтралью.

К достоинствам сети с изолированной нейтралью часто относят возможность продолжения ее работы при однофазном замыкании, что якобы повышает надежность электроснабжения потребителей. Такое утверждение по меньшей мере архаично. Опыт показывает, что в большинстве случаев однофазные замыкания из-за присущих сети недостатков быстро (если не мгновенно) переходят в двух- и трехфазные и поврежденная линия всё равно отключается.

При сохранении замыкания на землю у опор воздушных линий или у места падения провода возникают опасные напряжения прикосновения. Известно, что около половины тяжелых и смертельных электропоражений приходится на случаи, связанные с замыканиями на землю, а среди общего электротравматизма на первое место давно вышел электротравматизм в сетях среднего напряжения.

Воздушные электрические сети напряжением 380 В – самый ненадёжный элемент электроснабжения потребителей. Гололёд, сильный ветер, при котором в результате схлёстывания проводов возможно их перегорание или перетирание в местах крепления к изолятору, обрыв проводов механизмами или наезд на опору

транспортных средств – причины, создающие повышенную вероятность обрыва проводов и поражения людей и животных электрическим током

Электрические сети напряжением 380 В выполняются, как правило, воздушными, четырехпроводными с многократным заземлением нулевых проводов линий. Наряду с трехфазными потребителями, сети питают большое число однофазных потребителей. Последнее обуславливает несимметрию токов по фазам ВЛ-380 В и наличие, в связи с этим, тока в нулевом проводе, достигающего значения до 50% от рабочего фазного тока и более. Через повторные заземления ток нулевого провода отсасывается в нулевые провода соседних линий и в заземляющий провод нейтрали силового трансформатора ТП.

Защита электрических сетей напряжением 380 В практически осуществляется плавкими предохранителями и автоматическими выключателями. Указанные защиты работают не всегда удовлетворительно, из-за малых кратностей токов короткого замыкания, температурной нестабильности характеристик тепловых расцепителей, низкого уровня эксплуатации и т.п. Кроме того, обрывы проводов являются одним из источников электротравматизма. Например, до 40 % электропоражений в сельскохозяйственном производстве приходится на воздушные линии электропередачи

Анализ аварийной статистики показал, что ежегодно на 100 км линий 380 В приходится 40–50 повреждений, причём около 62 % из них опасны для людей и животных. Примерно 40 % всех повреждений воздушных линий составляет обрыв фазного провода.

В электрических сетях напряжением 380 В обрывы проводов не всегда приводят к возникновению короткого замыкания и немедленному отключению линии, т.к. в большинстве случаев величина тока замыкания на землю является недостаточной для срабатывания защиты из-за большого сопротивления заземления упавшего провода. Провода воздушных линий электропередач 10 кВ работают в сложных условиях: они находятся под высоким напряжением, по ним протекает электрический ток, они подвергаются также воздействию климатических и атмосферных факторов (колебаниям температуры, воздействию ветра, атмосферных осадков, и образованию на их поверхности гололеда).

Под воздействием гололеда и колебаний температуры провода деформируются (удлиняются или укорачиваются) и изменяется их тяжение. Поэтому появляется опасность разрыва проводов и тросов в местах их дефектов.

На напряжения и токи электрической сети в общем случае влияют:

- различные несимметричные режимы работы электроприёмников, искажающих симметрию трёхфазной системы напряжений относительно нулевого рабочего провода, при симметричном режиме работе самой электрической сети;-
- различные сочетания обрывов фазных и нулевого проводов сети 380 В;
- различные сочетания замыканий фазных проводов с нулевым проводом ВЛ-380 В, а также замыкания этих проводов на землю;
- различные короткие замыкания в параллельных воздушных линиях, обрывы фазных проводов распределительных сетей с последующими замыканиями;

– симметричные повышения или понижения напряжений питающей сети вследствие возникающих в ней каких-либо возмущений – регулирование напряжения и т.д.

Параметры электрической сети 10/0,38 кВ приведены на схеме (рис.1.2)

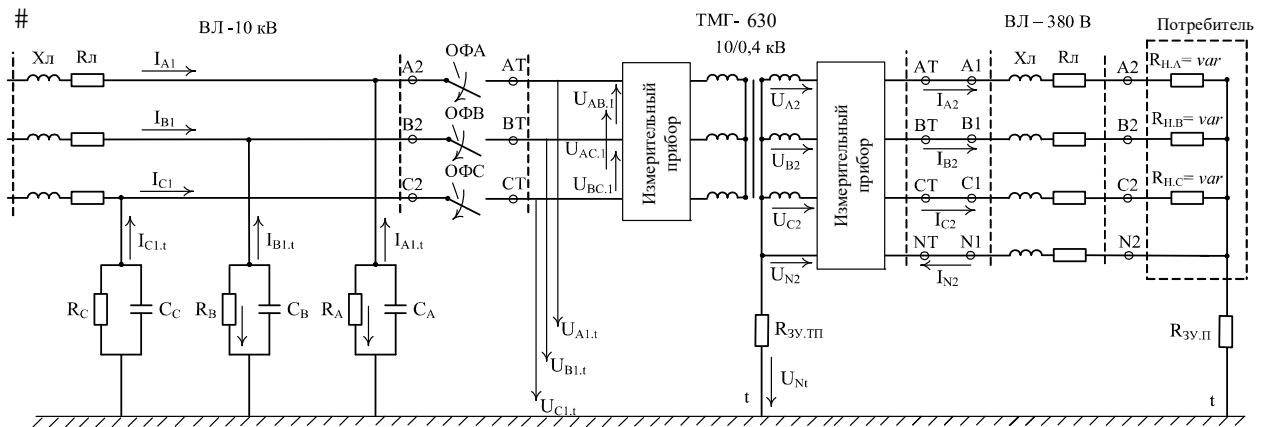


Рисунок 1.2 – Токи и напряжения электрической сети напряжением 10/0,38 кВ

- 1 На стороне высшего напряжения трансформатора;
- 2 На низкой стороне трансформатора;

При исследованиях режимов работы использованы следующие обозначения напряжений и токов:

1. На высокой стороне трансформатора:

$U_{AB,1}$, $U_{BC,1}$, $U_{CA,1}$ – линейные напряжения на ВН силового трансформатора;

$U_{A1,t}$, $U_{B1,t}$, $U_{C1,t}$ – напряжения фазных проводов относительно земли соответственно на высокой стороне трансформатора;

U_1 , U_2 , U_0 – симметричные составляющие напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности;

I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} – фазные токи протекающие на ВН силового трансформатора ТМГ-630 кВ·А;

I_1 , I_2 , I_0 – симметричные составл.токов прямой, обратной и нулевой последовательности;

$\varphi U_{A1}U_{B1}$, $\varphi U_{B1}U_{C1}$, $\varphi U_{C1}U_{A1}$ – углы между фазными напряжениями относительно земли;

2. На низкой стороне трансформатора:

$U_{AB,2}$, $U_{BC,2}$, $U_{CA,2}$ – линейные напряжения на НН силового трансформатора ТМГ-160 кВ·А;

U_{A2} , U_{B2} , U_{C2} – фазные напряжения проводов относительно нейтральной точки трансформатора;

U_1 , U_2 , U_0 – симметричные составляющие напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности;

I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} – фазные токи протекающие на низкой стороне силового трансформатора ТМГ-630 кВ·А;

I_1 , I_2 , I_0 – симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательности;

$\varphi U_{A2}U_{B2}$, $\varphi U_{B2}U_{C2}$, $\varphi U_{C2}U_{A2}$ – углы между фазными напряжениями.

1.2 Статистика аварийных ситуаций в сетях напряжением 10 кВ ПО ЦЭС

Эксплуатируемые в настоящее время в Российской Федерации ВЛ 6–10 кВ выполнены практически одинаково. И только в ряде случаев учитываются местные особенности (вероятность ледообразования, налипания мокрого снега, ветровой нагрузки). Рассмотрим характеристики указанных линий на примере электрических сетей Челябэнерго.

Для получения технических характеристик ВЛ 6–10 кВ проведена обработка статистических данных для двух различных районов электрических сетей Челябэнерго, расположенных в сельской местности (Красноармейский РЭС) и в пригородном районе г. Челябинска (Сосновский РЭС). На рис. 1 для рассмотренных ВЛ 6–10 кВ представлены распределения по параметрам, во многом определяющим надежность и безопасность электроснабжения: по общей длине ВЛ, длине магистральных участков, количеству и длине отпаек от ВЛ, суммарной мощности трансформаторных подстанций, подключенных к ВЛ. Максимальные и средние значения характеристик ВЛ приведены в таблице.

В целом распределительные электрические сети напряжением 6–10 кВ обоих районов построены по радиальному принципу с отпайками. Большинство потребителей имеют резервное питание по нескольким линиям, при этом 25 % резервного питания приходит от разных подстанций. ВЛ характеризуются большой протяженностью и разветвленностью, выполнены в основном алюминиевыми и сталеалюминиевыми проводами сечением от 35 мм² (отпаечные участки) до 70–90 мм² (магистральные участки). Лишь 5,1 % линий выполнены самонесущим изолированным проводом (СИП) и 2,46 % – кабелем. Подавляющее большинство линий имеют длину менее 4 км и несколько отпаек. Длины отдельных отпаек от большинства ВЛ не превышают 300 м.

Электрические сети пригородного района в отличие от сельских сетей имеют более разветвленную структуру. Как максимальные, так и средние длины ВЛ и отпаек в пригородном районе несколько больше, чем в сельском. Это объясняется возрастающей в последнее время коттеджной застройкой пригорода, а также большим количеством садовых некоммерческих товариществ, расположенных в этом районе. В связи с тем, что при прокладке новых ВЛ используют СИП, в пригородном районе по сравнению с сельским, протяженность ВЛ, выполненных СИП, в 2,2 раза больше.

Статистические данные по ОФП ВЛ-10 кВ взяты из сведений о технологических нарушениях в "Челябэнерго" за I, II, III, IV квартал 2017 и 2018 гг. Из этих данных выбраны только обрывы фазных проводов ВЛ 6-10 кВ. На основе этих данных построен график за 8 кварталов 2017-2018 гг. График приведён на рисунке 1.3. Как видим из графика, наибольшее число обрывов приходится на июнь 2017 года.

Основными технологическими причинами повреждений ВЛ являются грозовые перекрытия изоляции, гололедно-изморозевые отложения, ветровые нагрузки, вибрация и пляска проводов, возгорание деревянных опор, ослабление механической прочности деталей опор, повреждение опор и проводов автотранспортом и сельскохозяйственной техникой.

Внешние воздействия приводят к перекрытию изоляции, разрыву изоляторов, оплавлению металлических деталей, обрыву проводов, снижению их механической прочности при вибрации и пляске в результате разлома отдельных проволок, поломке деталей, падению стоек вместе с проводами.

Согласно сводке отключений «Челябэнерго» за I, II, III, IV квартал за 2017 и 2018 гг. была произведена выборка по необходимым критериям, а именно:

- класс напряжения сети отключенного элемента – 10 кВ;
- балансовая принадлежность – МРСК Урала;
- идентификация вида отключения – ОФП;
- районные электрические сети.

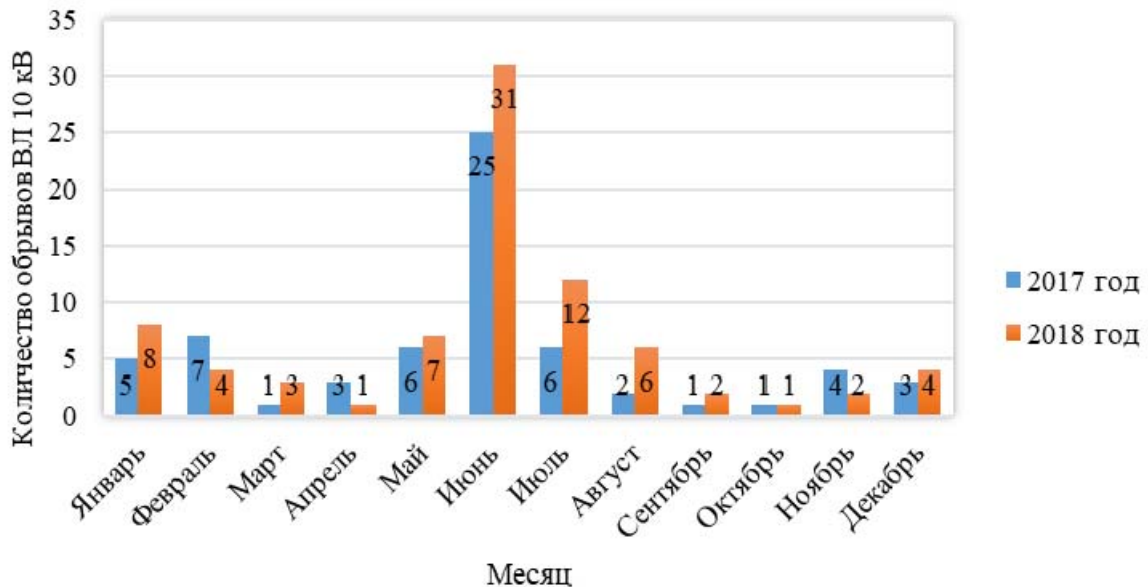


Рисунок 1.3 – Статистика обрывов фазного провода ВЛ 6-10 кВ

К воздействиям сторонних лиц относится: наезд наземного транспорта на опоры; работа кранов с последующим обрыванием проводов ЛЭП; самовольное включение отпаек; повреждение траверс; схлест (возникновение междуфазного короткого замыкания) проводов в результате наезда автотранспорта.

В сетях "Челябэнерго" как и в любых других сетях существуют мероприятия по снижению аварийности по видам оборудования:

1 Работы по тех. присоединению в сетях 0,4–10кВ выполнять силами подрядных организаций, тем самым персонал по обслуживанию сетей вернуть к своим прямым обязанностям.

2 Не снижать объемы по расчистке трасс ВЛ 6–10кВ и вырубке угрожающих деревьев

3 Увеличить объемы по реконструкции электрических сетей 6–10 кВ (замена голого провода на СИП). В 2011 году выполнено СМР по реконструкции ВЛ 6-10 кВ – 1,08 км, 2012 г. – 5,8 км, 2013 г. – 19,7 км)

4 Принятие электрических сетей сторонних собственников на балансе ПО ЦЭС или заключение договоров аренды после реконструкции или ремонта

5 Проведение разъяснительной работы среди населения.

В настоящее время в целом по России около 40 % линий выработали нормативный ресурс и более 80 % нуждаются в техническом перевооружении [2]. В

среднем в этих сетях происходит до 30 отключений в год в расчете на 100 км воздушных линий [1].

ВЛ 6–10 кВ достаточно часто подвержены авариям. Около 50 % всех нарушений электроснабжения (по данным актов аварийных отключений в электрических сетях Челябэнерго за 2015 год) происходит именно в сетях данного класса напряжения.

Наиболее часто обрыв провода происходит по причине изношенности оборудования линии. Большинство ВЛ 6–10 кВ построены в 80-х – начале 90-х годах прошлого столетия, а при сроке эксплуатации более 25 лет они требуют капитального ремонта или реконструкции. Всего 1,3 % линий 6–10 кВ было реконструировано за прошедший год в Центральных электрических сетях Челябэнерго. С каждым годом все больше воздушных линий необходимо включать в инвестиционные программы реконструкции и развития электрических сетей.

Рассмотрим подробнее причины обрывов проводов ВЛ.

Значительное влияние на обрывы проводов оказывает климатический фактор (сильные порывы ветра, воздействие низких температур, налипание снега на провода). Особенно сильно ВЛ подвержены непогоде в весенне-летний период (сильные, шквалистые ветра, грозы). Что часто приводит к падению высоких деревьев или отдельных веток на провода ВЛ, находящихся за пределами их охранной зоны (10 метров и далее). Расширение трассы поможет сократить аварии, произошедшие по этой причине, однако такое решение экономически нецелесообразно.

Посторонние, несанкционированные воздействия являются еще одной серьезной причиной обрывов проводов ВЛ 6–10 кВ. Чаще всего это воздействие грузового и сельскохозяйственного негабаритного транспорта непосредственно на провода ВЛ при пересечении линией дорог, неумышленное повреждение проводов при работе вблизи охранной зоны, наезд транспортных средств на опору, несанкционированная вырубка деревьев вблизи линии. Для уменьшения количества аварий, вызванных наездом автотранспорта на опоры ВЛ, в последнее время устанавливают железобетонные отбойники вблизи самой опоры.

Обрыв провода в сети, подконтрольной непосредственно потребителю, помимо вышеперечисленных причин возникает также из-за плохого надзора собственников электрических сетей. Обращения к собственникам сетей с требованиями привести сети в соответствие с нормативно-технической документацией, подключение надзорных органов может улучшить положение.

Большое скопление птиц на проводах ВЛ может привести к обрыву провода из-за сильного натяжения, а в результате одновременного взлета птиц велика вероятность схлестывания проводов соседних фаз и последующий обрыв. Также они могут стать причиной короткого замыкания в линии, длительное воздействие которого повышает вероятность обрыва.

Грозовые перенапряжения возникают при прямом попадании молнии в ВЛ или рядом с ней. Но установка современных грозозащитных средств (ограничители перенапряжения, мультикамерные разрядники) позволит повысить надежность ВЛ.

Выполнение графиков ремонта оборудования и технического обслуживания может уменьшить число обрывов проводов, вызванных несоблюдением требований эксплуатации.

К прочим причинам относятся, например, пожары на прилегающей к ВЛ территории, длительное воздействие токов короткого замыкания и др.

1.3 Опасности, возникающие при обрывах фазных проводов

Электрические сети напряжением 6–10 кВ, образованные воздушными линиями, работают, как правило, в режиме изолированной нейтрали, при котором обрыв провода и его падение на землю не приводят к срабатыванию релейной защиты и, соответственно, обесточиванию линии. Такие ВЛ могут находиться в работе длительное время, пока не будет обнаружено повреждение. Это создает опасную ситуацию для жизни людей и животных, оказавшихся вблизи места обрыва, а также может стать причиной пожара [4–8]. Так, в июле 2008 года на Куйбышевской железной дороге электромонтер, совершавший работу по устранению обрыва проводов притрассовой линии электропередачи напряжением 10 кВ, получил смертельную травму от воздействия электрическим током. В сентябре 2012 года в г. Казани стрелой экскаватора были оборваны провода воздушной линии напряжением 6 кВ, в результате чего были смертельно поражены электрическим током двое рабочих. В январе 2014 года в Костромской области электромонтер контактной сети железной дороги, держась рукой за металлическое ограждение, поднял ногой оборванный провод СИП ВЛ–10 кВ, находящийся под напряжением, что привело к смерти. В августе того же года, в Астрахани вследствие обрыва провода линии электропередачи загорелся автомобиль «Камаз» и сухая трава на площади 120 м². В июле 2016 года в условиях сильного ветра из-за падения дерева произошел обрыв провода ВЛ–10 кВ. Провод упал на ограждение частного дома, жительница которого, выходя из дома, коснулась металлической части ограждения и была смертельно поражена электрическим током [9–13].

Анализ причин несчастных случаев на электроустановках в Российской Федерации за период 2001–2005 гг., приведенный в [14], показал, что чаще всего несчастные случаи происходят в электрических сетях, причем доля несчастных случаев при работах на ВЛ составляет 40 % от всех несчастных случаев, произошедших в электроустановках.

В распределительных электрических сетях, находящихся на балансе операционных компаний, используются сети напряжением 0,4 - 220 кВ.

Общая протяжённость воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением 0,4-110 (220) кВ составляет 2109693,7 км, в том числе:

- линий напряжением 220 кВ - 2895,4км;
- линий напряжением 110 кВ - 254345,5км (в т.ч. ЛЭП 60 и 150кВ);
- линий напряжением 35 кВ - 162722км;
- линий напряжением 6-20 кВ - 947143,2км;
- линий напряжением 0,4 кВ - 742587,6 км;

Общее количество трансформаторных подстанций, находящихся в эксплуатации составляет 461864 ед., в том числе:

- напряжением 110-220 кВ - 6884 ед.;
- напряжением 35 кВ - 7304 ед.;
- напряжением 6-20 кВ - 447676 ед.

Средняя степень износа электросетевых объектов, включая здания и сооружения, составляет свыше 70%.

Воздушные линии напряжением 0,4-20 кВ построены по радиальному принципу с использованием, в основном, алюминиевых, неизолированных проводов малых сечений, а также деревянных и железобетонных опор с механической прочностью не более 27 - 35 кН·м.

Линии электропередачи напряжением 0,4-110 (220) кВ проектировались по критерию минимума затрат, а расчетные климатические условия принимались с повторяемостью один раз в 5 - 10 лет. В сетях напряжением 6-20 кВ происходит, в среднем, до 30 отключений в год в расчете на 100 км воздушных и кабельных линий. В сетях напряжением 0,4 кВ - до 100 отключений в год на 100 км.

Причинами повреждений на ВЛ 6-20 кВ являются:

- изношенность конструкций и материалов при эксплуатации - 18%;
- климатические воздействия (ветер, гололед и их сочетание) выше расчетных значений - 19%;
- грозовые перенапряжения - 13%;
- несоблюдение требований эксплуатации, ошибки персонала - 6%;
- посторонние, несанкционированные воздействия - 16%;
- невыясненные причины повреждений - 28%.

Основные причины повреждений ВЛ напряжением 0,4 - 10 кВ:

- Обрывы провода;
- Повреждение фарфоровых изоляторов;
- Повреждения опор и элементов опор (загнивание деревянных опор, сколы и трещины бетонных)

Техническая политика в области определения мест повреждения на ЛЭП направлена на решение следующих задач:

- повышение точности расчета мест повреждения, включая режим однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сети 6-35 кВ (определение места ОЗЗ в сетях 6-35 кВ необходимо выполнять с использованием технических средств, исключая метод поочередного отключения присоединений);
- сокращение времени определения места повреждения;
- сокращение издержек на поиск места повреждения.

Рассмотрим в качестве примера несчастный случай с человеком от электрического тока.

В первом случае, на воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением 10 кВ оборвался один из проводов. Участок этого провода длиной 2L лег на землю.

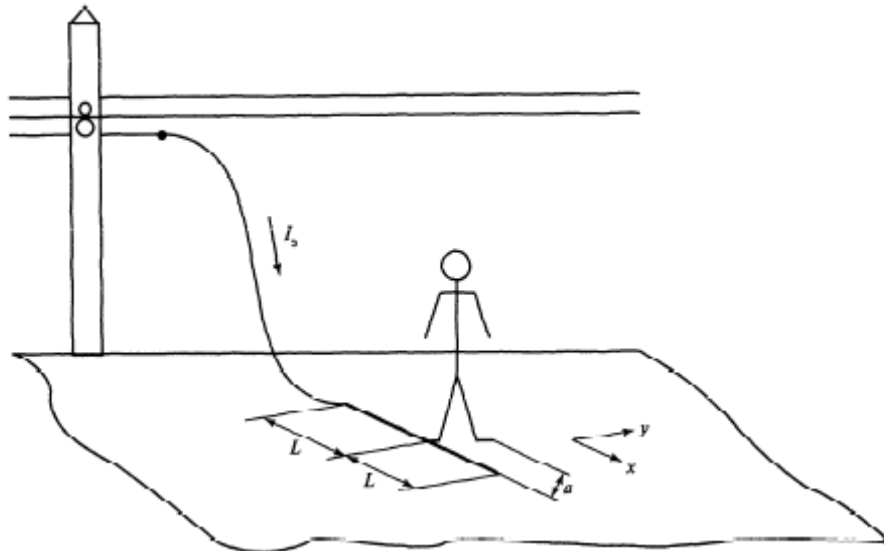


Рисунок 1.4 – Человек под шаговым напряжением

Человек, идущий поперек оси участка провода, лежащего на земле, наступил одной ногой на середину этого участка провода, а другой ногой на землю. Человек подвергся воздействию шагового напряжения и упал на землю, однако остался жив [34].

Исходные данные: длина линий электросети, в состав которых входит и поврежденный участок, составляет: $L=117$ км, из них воздушных 105 км, кабельных 12 км; длина участка провода, лежащего на земле 18 м; длина шага $a=0,8$ м; удельное сопротивление грунта 100 Ом·м; диаметр провода $d=0,02$ м; сопротивление тела человека 1000 Ом.

Требуется вычислить потенциал оборванного провода и шаговое напряжение пострадавшего.

Указания: принять, участок провода, лежащего на земле, погружен в землю на половину его диаметра; сопротивление обуви пострадавшего и сопротивление растекания тока с его ног вследствие сырой погоды принять равным нулю.

Решение. Рассматривается трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью с линейным напряжением 10 кВ.

Упавший на землю провод следует рассматривать как протяженный заземлитель круглого сечения. Человек, наступив одной ногой на провод, а второй на расстоянии $a=0,8$ м от него, подвергся воздействию напряжения шага.

Вычислив по формуле для потенциальной кривой, используя ток замыкания на землю (I_3), потенциалы и найдя их разность, получим напряжение прикосновения.

Уравнение потенциальной кривой протяженного заземлителя круглого сечения поперек оси заземлителя (по оси y) имеет вид:

$$\varphi_y = \frac{I_3 \rho}{\pi L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + 4y^2} + L}{2y} \quad (1.1)$$

Для трехфазной сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В (до 35 кВ), имеющей в своем составе участки кабельных и участки воздушных линий, ток замыкания на землю можно приближенно рассчитать по формуле:

$$I_3 = \frac{U_n}{350} (35L_k + L_B) = \frac{10}{350} (35 \cdot 12 + 105) = 15 \text{ А.} \quad (1.2)$$

Тогда, считая $y=0,5 d$, $l=2L$, потенциал оборванного провода

$$\varphi_1 = \frac{15 \cdot 100}{\pi 18} \ln \frac{\sqrt{18^2 + 4 \cdot (0,5 \cdot 0,02)^2} + 18}{2(0,5 \cdot 0,02)} = 199 \text{ В.}$$

Потенциал на расстоянии $a=0,8$ м от провода

$$\varphi_2 = \frac{15 \cdot 100}{\pi 18} \ln \frac{\sqrt{18^2 + 4 \cdot (0,8)^2} + 18}{2(0,8)} = 83 \text{ В.}$$

Шаговое напряжение

$$U_{ш} = \varphi_1 - \varphi_2 = 199 - 83 = 116 \text{ В.} \quad (1.3)$$

1.4 Существующие средства защиты от обрывов фазных проводов

Терминал защиты линии ТОР 200-Л

Комплектные устройства защиты и автоматики ТОР 200-Лхх [56] предназначены для выполнения функций релейной защиты, автоматики, местного/дистанционного управления, измерения, сигнализации, регистрации, осциллографирования, диагностики выключателей присоединений 6–35 кВ: КЛ и ВЛ, линии к трансформаторам собственных нужд (ТСН), линии к батареям статических конденсаторов (БСК).

Рассмотрим два вида защиты от обрыва фаз, построенных на использовании информации о токах обратной последовательности (ЗОФ I₂) и напряжений обратной последовательности (ЗОФ U₂).

Защиты предназначены для контроля целостности фаз первичных и вторичных цепей присоединений подстанций, имеющих двигательную нагрузку. Это предотвращает перегрузку двигателей при обрыве фазы со стороны питания подстанции. В этом случае может быть применено отключение ввода с дальнейшим действием АВР. На рисунке 1.5 представлена структурная схема защиты ЗОФ, построенная на использовании информации о токах обратной последовательности I₂.

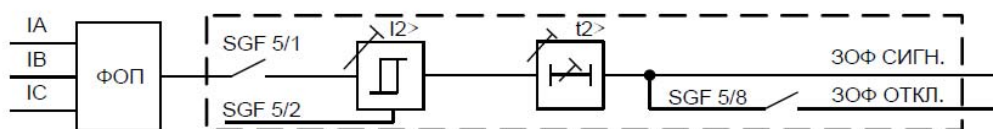


Рисунок 1.5 – Структурная схема защиты

В таблице 1.1 приведены параметры и характеристики защиты.

Таблица 1.1 – Параметры и характеристики защиты ЗОФ

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон уставок по току обратной последовательности, А	От 0,03 до 2,5 I_N
Диапазон уставок по времени, с	От 0,06 до 300
Время срабатывания, мс	65
Коэффициент возврата, не менее	0,9

При возникновении обрыва ВЛ в сети 10 кВ и поскольку система напряжений и токов становится несимметричной, в сети будут присутствовать составляющие тока обратной последовательности, которые могут быть зафиксированы фильтром токов обратной последовательности ФТОП. Выявленный ток I_2 пороговым элементом с гистерезисной характеристикой ($I_2 >$) сравнивается с регулируемой (задаваемой) уставкой и при её превышении на выходе блока появляется логическая единица, которая проходит через блок выдержки времени ($t_2 >$). Если длительность сигнала I_2 превышает выдержку времени, то формируется сигнал на оповещение диспетчерского персонала электрических сетей о возникновении аварийной ситуации, который начинает осуществлять поиск места повреждения ВЛ-10 кВ. Сигнал на отключение (ключ SGF 5/8), как правило, не используется.

Реклоузеры Таврида Электрик Rec15 L5 и Rec25 L5

Реклоузеры вакуумные серии PBA/TEL типа Rec15 L5 и Rec25 L5 [53] предназначены для применения в воздушных электрических сетях напряжением 6–10 кВ для Rec15 и 20 кВ для Rec25 в качестве пунктов автоматического секционирования линии в проектах комплексного повышения надежности электроснабжения потребителей.

Рассмотрим интересующую нас защиту от обрыва фазы, построенную на использовании информации о напряжении обратной последовательности. Защита обеспечивает отключение чувствительной нагрузки при обрыве фазы в питающей сети.

При образовании продольной несимметрии в сети 10 кВ фильтр напряжения обратной последовательности ФНОП выделяет напряжение U_2 , в относительных единицах (по отношению к номинальному напряжению сети U_1).

Таблица 1.2 – Параметры ЗОФ U_2 для радиального типа сети

Параметры		Значение параметров
ЗОФ U_2	Режим работы	Введено/выведено
	Кратность U_2 к U_1 , о.е.	0,05-1,00
	t_{CP} , с	0,1-100,00

Таблица 1.3 – Параметры ЗОФ U_2 для кольцевого типа сети

Параметры		Значение параметров
3ОФ U2	Режим работы (со стороны +)	Введено/выведено
	Кратность U2 к U1, о.е. (со стороны +)	0,05-1,00
	t_{cp} , с (со стороны +)	0,1-100,00
	Режим работы (со стороны -)	Введено/выведено
	Кратность U2 к U1, о.е. (со стороны -)	0,05-1,00
	t_{cp} , с (со стороны -)	0,1-100,00

Логика работы 3ОФ U2 отображена на рисунке 1.6

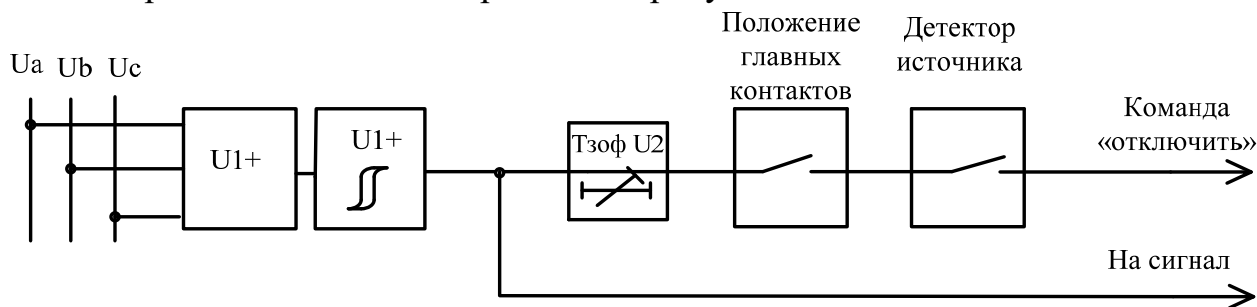


Рисунок 1.6 – Логика работы 3ОФ

Полученное соотношение U_2/U_1 подаётся пороговый элемент с гистерезисом с регулируемой (задаваемой) уставкой.

При превышении уставки выходной сигнал порогового элемента проходит через блок выдержки времени и при длительном существовании сигнала U_2 устройство формирует сигнал диспетчерскому персоналу электрических сетей о возникновении аварийной ситуации (об обрыве фазы).

Цифровой блок релейной защиты типа БМРЗ-100

Цифровой блок релейной защиты типа БМРЗ-100 предназначен для выполнения функций релейной защиты, автоматики, управления и сигнализации присоединений напряжением от 6 до 35 кВ, в сетях 0,4 кВ, а также резервной защиты и автоматики присоединений 110 и 220 кВ [14].

В таблице 1.4 представлены уставки защит блока защиты обрыва фазы 3ОФ.

Таблица 1.4 – Уставки защит 3ОФ

Функция	Уставка	Заводская установка	Диапазон	Дискретность
3ОФ	$I_2 >$	1,00 А	От 0,20 до 20,00 А	0,01 А
3ОФ	$T_{3оф}$	3,00 с	От 1,00 до 50,00 с	0,01 с

Функциональная схема алгоритма защиты представлена на рисунке 1.7.

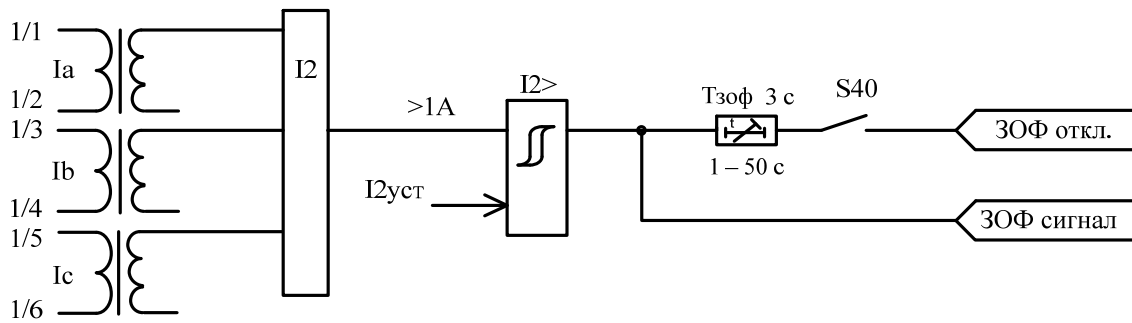


Рисунок 1.7 – Функциональная схема алгоритма защиты от обрыва фаз

При возникновении обрыва провода ВЛ в сети 10 кВ фильтр токов обратной последовательности ФТОП выделяет ток I_2 , который сравнивается с задаваемой уставкой в пороговом блоке « I_2 » и при определенной по длительности блоком выдержки времени « $T_{зоф}$ » формируется сигнал диспетчерскому персоналу электрических сетей о возникновении аварийной ситуации (обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ).

Вопросами повышения надёжности электроснабжения сельских потребителей, питающихся по ВЛ 6–10 кВ, и, следовательно, улучшения условий электробезопасности начали активно заниматься в период 1960–1985 гг., когда было осуществлено массовое строительство сельских электрических сетей напряжением 0,38–110 кВ [23].

Был предложен ряд идей и технических предложений построения защиты ВЛ, однако существовавший уровень развития электроники не позволил их реализовать в полной мере и в настоящее время воздушные линии 6–10 кВ оснащены в основном токовыми защитами и средствами автоматики, установленными в их начале и не позволяющими принципиально определять обрыв фазного провода.

Появление микропроцессорной техники и различного рода средств современной связи позволило, с одной стороны, разрабатывать средства защиты и автоматики с качественно новыми функциональными возможностями, с другой стороны, реализовать наиболее интересные идеи и технические решения, нереализованные (предложенные) ранее. С начала XXI-го века в России и за рубежом серийно начали выпускать микропроцессорные устройства (блоки), которые выполнены в виде одного блока и позволяют реализовать несколько функций защиты и автоматики воздушных линий напряжением 6–10 кВ, в том числе, интересующую нас функцию «Защита от обрыва фазы».

В микропроцессорных устройствах защиты для выявления обрыва фазного провода ВЛ 6–10 кВ, как правило, используют два режимных параметра (токи обратной последовательности и напряжения обратной последовательности) с различными вариантами построения логической части устройства защиты. Рассмотрим их.

1. Защиты, в которых для определения обрыва провода используется информация о токе обратной последовательности I_2 или отношении этого тока к току первой гармоники I_2/I_1 , устанавливаются, как правило, на питающей подстанции ПС в начале воздушной линии (рисунок 1.8, а). К таким относятся защиты, приме-

няемые, например, в терминале ТОР 200-Л (ООО «Релематика») [47], блоке БРМЗ-102 (ООО «НТЦ «Механотроника») [58], устройстве «Сириус-2-Л» (АО «РАДИУС Автоматика») [41], реле MiCOM P126 компании «Schneider Electric» [28] и др.

На рисунке 1.8, б приведён один из вариантов построения алгоритма защиты от обрыва фазы (ЗОФ), реализованный в блоке БРМЗ-102. Информация с трёх трансформаторов тока ТА, установленных в начале линии, подаётся на устройство защиты А. Три фазных тока I_A, I_B, I_C , протекающих по фазам ВЛ, подаются на входы блока вычисления тока обратной последовательности I_2 и блока вычисления отношения тока обратной последовательности к току прямой последовательности I_2/I_1 . С помощью программного ключа S995 и логического элемента 1 (ИЛИ) выбирается вариант алгоритма работы защиты от обрыва фазы.

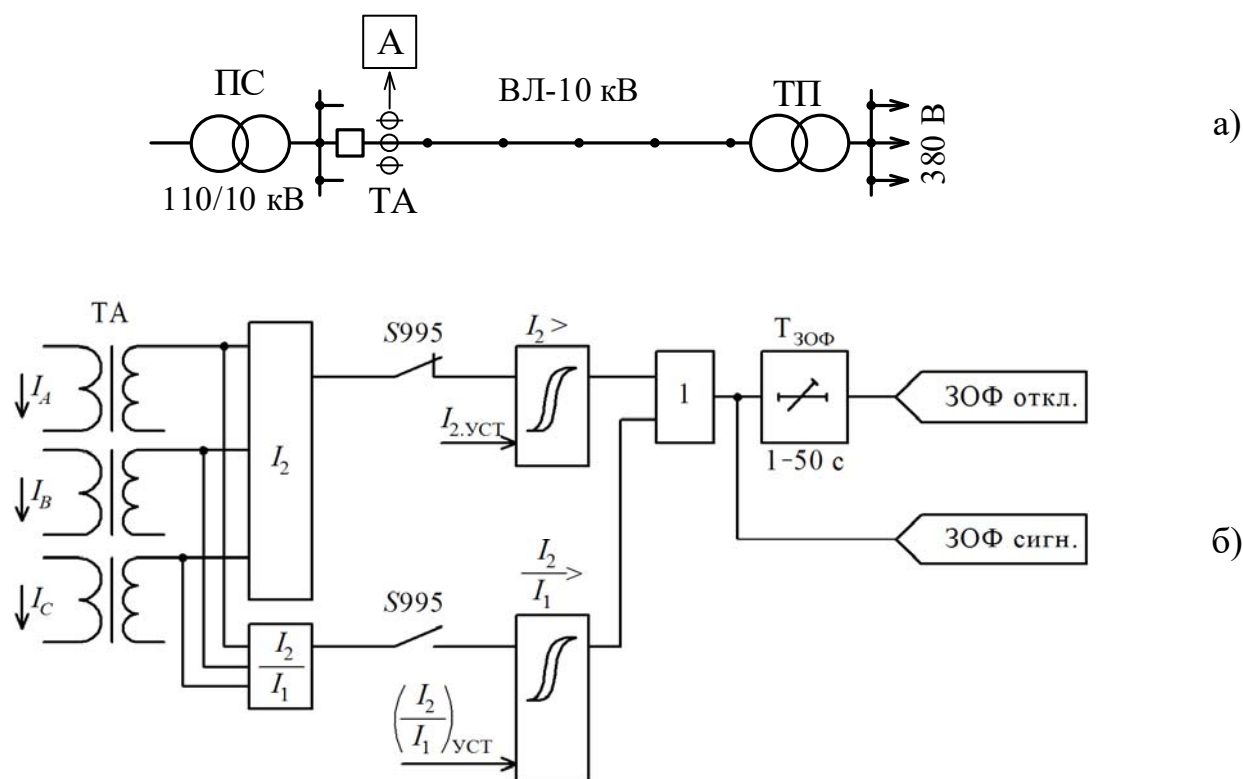


Рисунок 1.8 – Алгоритм работы защиты с использованием информации о токе обратной последовательности (на примере блока БРМЗ-102)

В первом варианте алгоритма ток обратной последовательности I_2 пороговым элементом с гистерезисной характеристикой ($I_2 >$) сравнивается с задаваемой уставкой $I_{2.уст}$ и при её превышении на выходе блока $I_2 >$ появляется логическая единица, которая через логический элемент 1 поступает на вход блока выдержки времени $T_{ЗОФ}$. Во втором варианте алгоритма соотношение токов $\frac{I_2}{I_1}$ пороговым

элементом $\frac{I_2}{I_1} >$ сравнивается с задаваемой уставкой $\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_{уст}$. Задержка выходного сигнала устройства защиты может регулироваться в пределах 1–50 с. Если дли-

тельность сигналов I_2 или I_2/I_1 превышает выдержку времени, то формируется сигнал ЗОФ_{ОТКЛ} на отключение ВЛ или сигнал ЗОФ_{СИГН} на оповещение диспетчерского персонала электрических сетей о возникновении аварийной ситуации

Анализ работы данного вида защит показывает:

А. Защита чётко может защищать только радиальную линию с сосредоточенной нагрузкой в её конце, т. к. ток нагрузки и, следовательно, возникающий при обрыве фазного провода ток обратной последовательности по длине линии не изменяются. Такими могут быть кабельные линии или воздушные линии, питающие сосредоточенную нагрузку.

Б. Защита может определять обрыв фазного провода при её установке как в начале ВЛ, так и конце ВЛ перед потребителем, т. е. защита может чувствовать обрыв фазного провода в ВЛ как после места установки, так и до места установки (рассматривая направление передаваемой мощности по ВЛ).

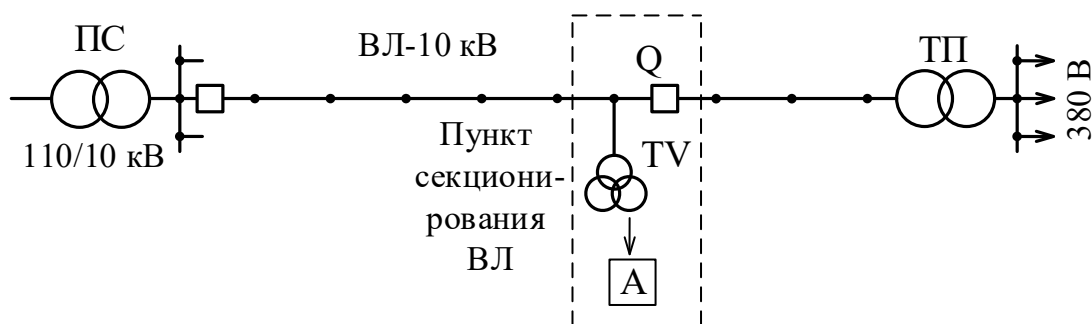
В. В воздушной линии с распределённой нагрузкой по её длине имеются участки (конец магистрального участка и отпаечные участки), где токи нагрузки могут составлять 10–20 % и менее тока нагрузки в начале ВЛ, где устанавливается

ЗОФ. По некоторым расчётам при уставке ЗОФ $\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_{уст} = 0,2$ (рекомендуемой

производителями защиты [53], зона нечувствительности защиты может возникать при токах нагрузки участка, составляющего менее 30 % тока нагрузки в начале ВЛ.

Г. Чувствительность защит, использующих информацию об абсолютном значении тока обратной последовательности I_2 , зависит от величины тока нагрузки ВЛ. Поскольку уставка защиты определяется по некоторому расчётному (максимальному) току нагрузки, то с уменьшением тока нагрузки ВЛ увеличивается зона нечувствительности защиты, т. е. возрастает зона удалённых или отпаечных участков, где защита обрыва фазного провода не чувствует.

2. Защиты, в которых для определения обрыва провода используется информация о напряжении обратной последовательности U_2 или отношении этого напряжения к напряжению первой гармоники U_2/U_1 , устанавливаются в конце зоны защиты, например, в конце радиальной линии или в середине линии в пунктах секционирования ВЛ (рисунок 1.9, а). К таким относятся защиты, применяемые, например, в реклоузере TER Rec15 L5 компании «Таврида Электрик» и реклоузере Recloser 3AD компании Siemens и др.



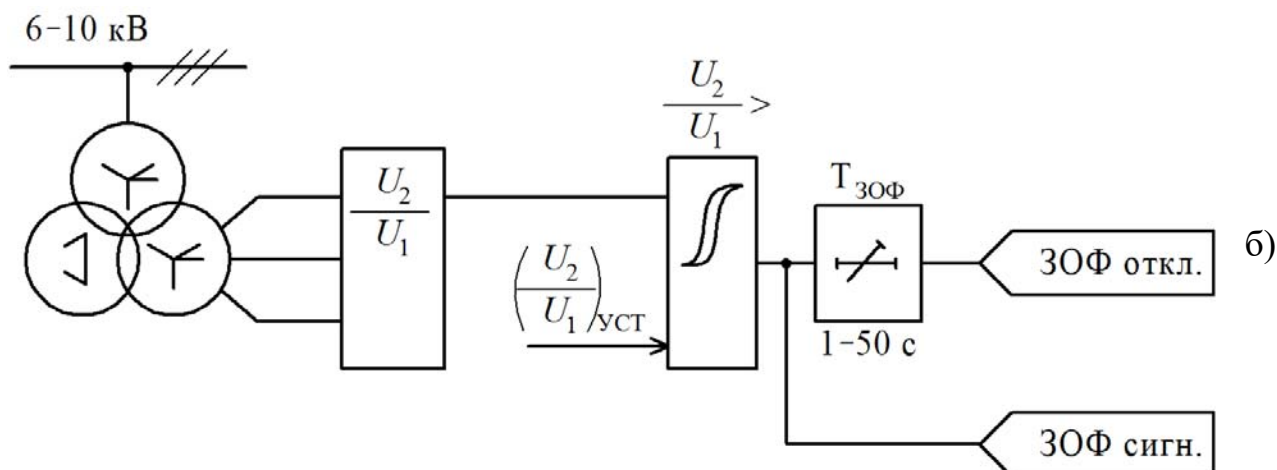


Рисунок 1.9 – Алгоритм работы защиты с использованием информации о напряжении обратной последовательности (на примере блока управления реклоузера TER Rec15 L5)

На рисунке 1.9, б приведён вариант построения алгоритма защиты, реализованный в блоке управления реклоузера TER Rec15 L5, в котором для построения защиты используется информация о соотношении напряжений U_2/U_1 . Три линейных напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} подаются на входы блока вычисления отношения напряжения обратной последовательности к напряжению прямой последовательности $\frac{U_2}{U_1}$, которое пороговым элементом с гистерезисной характеристикой $\frac{U_2}{U_1} >$

сравнивается с задаваемой уставкой $\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_{уст}$ и при её превышении на выходе

блока $\frac{U_2}{U_1} >$ появляется логическая единица, которая поступает на вход блока вы-

держки времени $T_{3Ф}$. Если длительность сигнала U_2/U_1 превышает выдержку времени, то формируется сигнал $3Ф_{откл.}$ на отключение ВЛ или сигнал $3Ф_{сигн}$ на оповещение диспетчерского персонала электрических сетей о возникновении аварийной ситуации

Анализ работы данного вида защит показывает:

А. Зона действия защиты начинается от питающей подстанции и заканчивается местом установки блока защиты. Обрыв фазного провода за блоком защита не чувствует. Поэтому одним из вариантов организации защиты разветвлённой воздушной линии является размещение блоков защиты в конце участков ВЛ.

Б. Для полного обеспечения защиты разветвлённой ВЛ требуется большое количество блоков, следовательно, необходимы большие капитальные затраты.

В. Одним из вариантов реализации защиты ВЛ от обрыва фазного провода является вариант, применяемый в реклоузерах, которые в последнее время стали устанавливать в пунктах секционирования вместо ранее установленных разъединителей. В частности, ПАО «Россети» в настоящее время реализует несколько пилотных проектов построения «цифрового района электрических сетей».

В реклоузерах TER Rec15 L5 компании «Таврида Электрик» применена защита от обрыва фазного провода, для построения которой используются одновременно два информационных параметра – отношение токов I_2/I_1 и отношение напряжений U_2/U_1 , что позволяет определять не только факт возникновения обрыва провода, но и с какой стороны (на каком участке) относительно реклоузера находится это повреждение.

На рисунке 1.10 показана воздушная линия напряжением 10 кВ, подключенная к подстанции напряжением 110/10 кВ и питающая трансформаторную подстанцию напряжением 10/0,4 кВ. Воздушная линия имеет два участка W1 и W2, между которыми установлен реклоузер REC15. Датчики напряжений и токов защиты установлены с двух сторон реклоузера. Поскольку поток мощности идёт от ПС к ТП, то защита, использующая в качестве информационного параметра отношение напряжений U_2/U_1 , чувствует обрыв провода только на участке W1: при обрыве провода на участке W1 отношение возрастает с нуля до единицы $U_2/U_1 = 1$, а при обрыве провода на участке W2 оно не меняется $U_2/U_1 = 0$. Защита, использующая отношение токов I_2/I_1 , на изменения токов при обрыве провода до и после реклоузера реагирует одинаково – отношение возрастает с нуля до единицы $I_2/I_1 = 1$. Проанализировав изменяющиеся отношения, можно определить с какой стороны реклоузера произошёл обрыв фазного провода ВЛ.

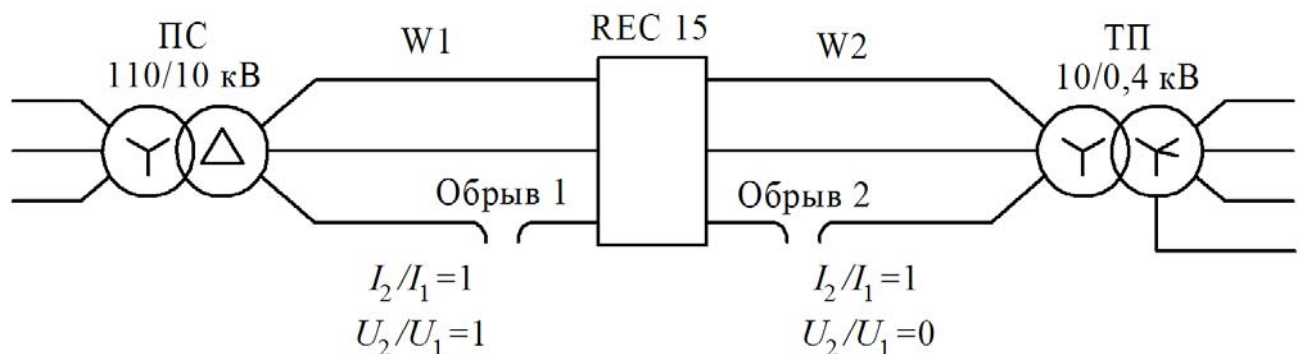


Рисунок 1.10 – Определение обрыва фазного провода с использованием блока управления реклоузера TER Rec15 L5

Г. При вводе в работу защит от обрыва фазного провода ВЛ 6–10 кВ, использующих информацию о токах или напряжениях обратной последовательности, возникает вопрос о значениях уставок – как правило, производители защит рекомендуют конкретные значения уставок без рекомендаций и учёта особенностей электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ. С другой стороны, в технической литературе отсутствуют данные или исследования по изменению токов и напряжений обратной последовательности в этой сети при влиянии различных факторов, особенно несимметрии фазной нагрузки потребителей напряжением 380 В. В результате такого положения токовые защиты ВЛ 6–10 кВ, которые разработаны достаточно давно, в электрических сетях ПАО «Россети», в частности, в филиале ОАО «МРСК Урала» – Челябинэнерго фактически выведены из работы или вообще не вводились в работу.

Устройства защиты, рассмотренные в предыдущих двух пунктах, позволяют выявить участок ВЛ с повреждением. Однако для протяжённой ВЛ или ВЛ, имеющей значительное количество отпаек, встаёт задача определения местонахождения этого участка на схеме воздушной линии или на географической карте. Имеется несколько вариантов решения этой задачи. Рассмотрим их.

В системах мониторинга для определения местоположения коротких замыканий используются датчики тока, устанавливаемые либо на начальных участках разветвлённой ВЛ, либо распределённой по длине ВЛ. Информация от датчиков тока поступает по ~~каким-либо~~ каналам связи в единую геоинформационную систему, которая на географической карте показывает местоположение участка ВЛ с возникшим повреждением.

В устройствах напряжение обратной последовательности фиксируются на стороне низшего напряжения трансформаторных подстанций (ТП), подключенных к разным участкам разветвлённой ВЛ.

При обрыве провода ВЛ в зависимости от места повреждения напряжение обратной последовательности появляется на стороне низшего напряжения одной или нескольких ТП. Для определения местоположения повреждённого участка персонал электрических сетей должен самостоятельно проанализировать информацию, поступившую от одной или нескольких ТП, где находится участок ВЛ с оборванным проводом.

Описание методов поиска повреждённого участка ВЛ, в которой устанавливаются реклоузеры, пока в технической литературе отражения не нашли.

Общей особенностью рассмотренных методов определения повреждённого участка ВЛ являются большие капитальные вложения для получения результата. Это установка либо датчиков тока с устройствами сбора и передачи информации, либо реклоузеров с блоками управления.

Учитывая особенности построения разветвлённых воздушных линий напряжением 10 кВ (большая протяжённость до 15–20 км, значительное количество отпаек до 5–10 шт.), для организации защиты от обрыва фазного провода только одной ВЛ может понадобиться установка до 10–20 комплектов датчиков тока или реклоузеров. А учитывая, что в сельских РЭС количество ВЛ-10 кВ достигает 50–100 шт. (данные по Челябинэнерго), общая задача организации защиты обрыва провода с использованием реклоузеров (цена реклоузера 10 кВ компании «Таврида Электрик» без монтажа и наладки составляет около 500000 руб.) потребует значительных капитальных вложений.

1.5 Актуальность защиты ВЛ 6–10 кВ при обрывах фазных проводов

Электроснабжение городских посёлков с малоэтажной застройкой, сельских потребителей осуществляется, в основном, по воздушным линиям электропередачи напряжением 380 В, которые подключаются к трансформаторным подстанциям (ТП) напряжением 6–10/0,4 кВ, имеющих силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «треугольник – звезда с нулём», «звезда – звезда с нулём» или «звезда – зигзаг с нулём».

Воздушные линии (ВЛ) напряжением ВЛ 6–10 кВ, являются одним из основных элементов систем электроснабжения промышленных предприятий и объектов коммунального хозяйства, которые питают ТП напряжением 6–10/0,4 кВ. ВЛ 6–10 кВ, представляют собой сложный электротехнический комплекс, состоящий из проводов, изоляторов, траверс, опор, заземляющих устройств и разрядников, устройств защиты от аварийных режимов, в т.ч. от перегрузок и атмосферных перенапряжений. Общая протяженность, находящихся в эксплуатации в Российской Федерации воздушных линий напряжением 6–20 кВ составляет 947143,2 км на 01.01.2013. Средняя степень износа электросетевых объектов, включая здания и сооружения, составляет свыше 70%.

Надежность электроснабжения предприятий в значительной мере определяется надежностью ВЛ 6–10 кВ. Ежегодно аварийно отключается 10% всех ВЛ 6–10 кВ, находящихся в эксплуатации. Анализ аварий ВЛ 6–10 кВ показывает, что их основными причинами являются экстремальные климатические воздействия, неудовлетворительное строительство и эксплуатация элементов ВЛ (в т.ч. передвижных опор и грозовых разрядников), несоответствие длины пролетов и параметров опор. В сетях напряжением 6–20 кВ происходит, в среднем, до 30 отключений в год в расчете на 100 км воздушных и кабельных линий. Наиболее распространенными видами повреждений ВЛ 6–20 кВ являются междуфазные короткие замыкания, обрывы фазных проводов, однофазные замыкания на землю. Причинами повреждений на ВЛ 6–20 кВ являются:

- изношенность конструкций и материалов при эксплуатации – 18%;
- климатические воздействия (ветер, гололед и их сочетание) выше расчетных значений – 19%;
- грозовые перенапряжения – 13%;
- несоблюдение требований эксплуатации, ошибки персонала – 6%;
- построение, несанкционированные воздействия – 16%;
- невыясненные причины повреждений – 28%.

Частые повреждения ВЛ 6–10 кВ происходят из-за обрывов проводов, сближения и схлестывания проводов, ветровых и гололедных нагрузок, наезда техники и т.д. Среднее время восстановления одного отказа ВЛ 6–10 кВ составляет более 3-х часов, затраты на восстановление в среднем превышают 1 млн. руб., а ущерб, включая недоотпуск электрической энергии, может достигать 2 млн. руб. Поэтому особую актуальность приобретает необходимость повышения надежности ВЛ 6–10 кВ путем снижения количества междуфазных КЗ, однофазных замыканий на землю, повышением механической прочности проводов и опор. Сооружение ВЛ 6–10 кВ с неизолированными проводами требует отчуждения значительных площадей и значительных затрат, связанных с вырубкой и последующей периодической чисткой просек в лесной зоне. Аварийные режимы, вызванные повреждениями частей, доступными для прикосновения человека, и нарушениями целостности самих токоведущих частей, включая падения на землю фазных проводов воздушных линий электропередачи, представляют угрозу (иногда смертельную) для людей и животных. Безопасность является одним из важных факторов, оказывающих влияние на стоимость проектирования и эксплуатации электроустановок. Если не применять мер для обеспечения безопасности персонала, то

расходы на компенсацию ущерба для здоровья превысят расходы на разработку и применение средств защиты. Примерно 7–13% от всего числа травм и несчастных случаев, связанных с летальным исходом, приходится на поражение электрическим током. Эта статистика подкреплена реальными историями из жизни, каждая из которых несет в себе человеческое горе, связанное с гибелью людей от электротравм. Такие случаи далеко не редки.

Поскольку при обрыве фазного провода треугольник линейных напряжений не изменяется, то такой режим может продолжаться неопределенно долго, и вероятность случайного прикосновения к проводам оказывается недопустимо высокой. В настоящее время определение места повреждения является наиболее сложной, а часто и наиболее длительной операцией по восстановлению поврежденной линии электрической сети. Связанные с этим перерывы в электроснабжении приводят к недовыпуску промышленной продукции и снижению её качества.

Предотвратить опасность поражения током при обрывах проводов на линиях 10 кВ можно лишь путём быстрого автоматического отключения повреждённой линии защитой. Например, при срабатывании защиты потребителей по причине обрыва фазного провода в сети 10 кВ для обнаружения повреждения необходимо вести поиск сначала в сети 0,38 кВ, к которой подключен потребитель, и только после выяснения факта исправности этой сети подавать сигнал диспетчеру, который высылаёт ремонтную бригаду. Своевременное же определение сети, в которой произошла авария, значительно сокращает время поиска повреждения и, как следствие, снижает потери из-за недопуска электроэнергии. Для повышения качества, надёжности и безопасности электроснабжения потребителей необходимо осуществление целого ряда мероприятий, в том числе совершенствование устройств защиты, особенно устройств для обнаружения повреждений, таких как однофазных замыканий на землю и обрывов проводов линий в воздушных сетях напряжением 10 кВ. Защита электрических сетей напряжением 10 кВ осуществляется коммутационной аппаратурой, такой как масляные, вакуумные, воздушные и элегазовые выключатели, укомплектованные пневматическими или пружинными приводами. Исполнительные органы данных защит, такие как электромагниты со втягивающимися сердечниками, управляющие пневматическими клапанами далеко не всегда способны отключать указанные аварийные режимы.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что разработка устройств релейной защиты, противоаварийной автоматики от аварийных и ненормальных режимов в сетях напряжением 10 кВ представляет собой актуальную задачу, направленную на повышение надёжности электроснабжения и электробезопасности в городских посёлках и сельских районах.

1.6 Задачи исследования

Проведя анализ источников литературы по проблеме защиты от обрывов фазных проводов ВЛ электрических сетей напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью мы можем сделать вывод о том, что данный вид повреждения электрической сети не является опасным для электроприёмников, работающих на линейном напряжении, но для животных и населения, которые достаточно часто оказываются около места повреждения воздушных линий, описанное состояние электрической сети 10 кВ является крайне опасным.

При огромном количестве устройств и способов защиты от обрывов проводов воздушной линии, отметим, что на данный момент отсутствует их какое-либо внедрение как в сельских электрических сетях, так и посёлках городского типа.

Защита может определять обрыв фазного провода при её установке как в начале ВЛ, так и конце ВЛ перед потребителем, т. е. защита может чувствовать обрыв фазного провода в ВЛ как после места установки, так и до места установки (рассматривая направление передаваемой мощности по ВЛ).

В источниках технической литературы нет информации о количественных изменениях токов и напряжений обратной последовательности.

Чтобы достичь заявленную цель были поставлены следующие задачи исследования:

- 1 Провести теоретические (в программной среде Matlab) исследования токов и напряжений, возникающих в электрической сети при обрывах фазных проводов воздушных линий напряжением 10 кВ.

- 2 Обосновать критерии выявления обрывов фазных проводов указанных линий.

- 3 Провести анализ характеристик и оценить возможности их использования для построения релейной защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА ВЛ-10 кВ

2.1 Изменения напряжений и токов в электрической сети 10/0,38 кВ

Для проведения исследования и анализа изменений напряжений и токов в электрической сети 10/0,38 кВ рассмотрим основные положения метода симметричных составляющих: «В трехфазных электрических цепях возможны поперечные и продольные несимметрии. Для расчета несимметричных режимов линейных трехфазных электрических цепей можно использовать метод симметричных составляющих, который основан на представлении любой трехфазной системы величин (токов, напряжений и т.п.) в виде суммы в общем случае трех симметричных систем соответствующих величин, называемых симметричными составляющими системами данной несимметричной системы величин. 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 первого метода схема замещения и соответствующие уравнения состояния должны составляться для всех фаз с учетом взаимоиндукции между ними. Поэтому расчет таким методом оказывается громоздким даже при простой исходной схеме. А при наличии в расчетной цепи явно полюсных синхронных машин расчет дополнительно усложняется, так как подлежащие учету индуктивности фазных обмоток таких машин и взаимные индуктивности между этими обмотками, как было показано ранее, периодически изменяются.

Применение метода симметричных составляющих устраняет это затруднение, так как влияние вращающегося ротора в этом случае учитывается отличающимися друг от друга сопротивлениями для токов прямой и обратной последовательностей, причем эти сопротивления имеют простой физический смысл и задаются заводами— изготовителями синхронных машин. Таким образом, метод симметричных составляющих является не только математическим приемом, упрощающим расчеты несимметричных режимов, но и способом, существенно облегчающим представление физической сущности явлений в синхронных машинах при таких режимах. При расчетах несимметричных режимов трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих сначала определяют симметричные составляющие токов и напряжений, а затем по этим составляющим находят искомые токи и напряжения. Следовательно, применение указанного метода расчета несимметричных режимов предполагает использование принципа наложения, поэтому этот метод применим только к линейным цепям.

Метод симметричных составляющих позволяет существенно упростить расчет несимметричных режимов трехфазной цепи, если выполняется условие, что параметры всех фаз этой цепи одинаковы, а причиной нарушения симметрии является возникновение в одной или двух точках цепи поперечной или продольной несимметрии. При этом условии симметричные системы токов любой последовательности определяются только составляющими напряжений той же самой последовательности и соответственно симметричные системы падения напряжения на лю-

бом симметричном элементе электрической цепи связаны законом Ома с симметричными системами токов только одноименной последовательности:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= \underline{Z} \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_2 &= \underline{Z} \dot{I}_2; \\ \Delta \dot{U}_0 &= \underline{Z} \dot{I}_0; \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ — комплексы сопротивлений симметричного трехфазного элемента электрической цепи соответственно для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей или, сокращенно, комплексы сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей элемента. Выражение (2.1) показывает, что анализ несимметричных режимов линейных трехфазных симметричных цепей с помощью метода симметричных составляющих сводится к анализу трех симметричных систем, причем расчет для каждой последовательности можно вести независимо от других. Кроме того, при расчете достаточно составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей только для одной фазы. Это значительно упрощает расчеты, в том числе и в цепях с явнополюсными синхронными машинами, так как последние, как и другие элементы цепей, учитываются в соответствующих схемах замещения сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые принимаются постоянными.

Если же линейная электрическая цепь содержит трехфазный несимметричный элемент, то падение напряжения любой последовательности в этом элементе связано линейной зависимостью с токами всех последовательностей, причем коэффициенты при токах отдельных последовательностей являются функциями сопротивлений всех фаз.

Поэтому применение метода симметричных составляющих в этом случае связано со сложными вычислениями. В электрических системах не все трехфазные элементы симметричны. В частности, трехфазные трехстержневые трансформаторы являются несимметричными устройствами ввиду неодинакового взаимного расположения обмоток разных фаз. Однако эта несимметрия существенно проявляется лишь на холостом ходу и не имеет практического значения при нагруженных обмотках вследствие относительной малости токов холостого хода. Несимметричными могут быть и другие элементы электрических цепей. Но в энергосистемах принимаются и специальные меры по обеспечению симметрии этих элементов. К ним, в частности, относится транспозиция проводов воздушных линий электропередачи. Поэтому современные электрические системы практически симметричны. Это обстоятельство позволяет рассчитывать несимметричные режимы, связанные с возникновением несимметрии в одной или двух точках системы, с использованием метода симметричных составляющих, рассматривая все элементы системы симметричными. При этом вычисления токов и напряжений при продольной или поперечной несимметрии фактически сводятся к вычислению токов и напряжений эквивалентного симметричного режима [58].

Между тем метод симметричных составляющих применим только к величинам, изменяющимся во времени по синусоидальному закону. Однако при расчете несимметричных режимов электроэнергетических систем обычно учитывают лишь основную гармонику токов и напряжений. Это позволяет использовать метод симметричных составляющих для расчета не только несимметричных установившихся режимов, но и несимметричных переходных процессов».

2.2 Исходные положения для проведения исследований

Понятие исходные положения для проведения исследований включает в себя: представление полного описания исходных данных проведения исследований – параметров электрической сети; представление информационных параметров, подлежащих исследованию; инструментарий, с помощью которых проводятся исследования.

Для изучения исследуемых режимов работы электрической сети напряжением 10/0,38 кВ и подтверждения точности полученных измерений необходимо реализовать способы исследования процессов, протекающих в электрической сети:

- Теоретические исследования с использованием симметричных составляющих;
- Исследование процессов на компьютерной модели.

Каждый из методов требуют к себе качественного подхода и повсеместно используются на практике в области исследования электрических сетей смешанных конфигураций и уровней напряжения.

Только получив качественные и точные показания всех методов, найдя общий закон изменения полученных результатов можно сказать о том, что результат полностью соответствует действительности.

Была создана электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ с возможностью исследования симметричных и несимметричных режимов.

В качестве основного метода исследования режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ был взят метод симметричных составляющих, описанный в пункте 2.1, позволяет более объективно и полно изучить и проанализировать несимметричные режимы рассматриваемой электрической сети.

Параметры моделируемой нами системы представлены в таблице 2.1.

Согласно выше поставленным задачам, необходимые исследования, проводимые на компьютерной модели:

1 Исследование изменений напряжений и токов при следующих режимах работы сети:

- Обрывы фазных проводов сети на стороне ВН (Обрыв фазы А);
- Нормальный режим (НР) с регулируемой симметричной и несимметричной нагрузкой по фазам потребителя;

2 Исследование защитных устройств электрической сети от несимметричных режимов работы, в том числе, устройств выявления обрывов фазных проводов в электрической сети с изолированной нейтралью.

Первый этап исследований проводится с целью исследования изменения напряжений и их симметричных составляющих при обрывах проводов.

Второй этап исследований позволяет проводить определение работоспособности и эффективности устройств защиты от обрывов фазных проводов.

Таблица 2.1 – Параметры моделируемой системы

Элемент схемы	Параметр	Величина
Трансформатор ТМГ-630/10/0,4	Мощность Т1	630,0 кВ·А
	Мощность Т2	630,0 кВ·А
	Высшее напряжение	10,0 кВ
	Низшее напряжение	0,4 кВ
	Схема соединения обмоток	Y/Y _H -0,
Воздушная линия напряжением 10 кВ АС-3х70 мм ²	Длина линии Л1	10 км
	Длина линии Л2	3 км
	Длина линии Л3	3 км
	Сечение проводов	70,0 мм ²
	Количество проводов	3,0 шт
Сопротивления заземляющих устройств	ТП	4,0 Ом
	Повторное заземление ВЛ	30,0 Ом
	Потребителя	10,0 Ом
Предельная (номинальная) активная мощность потребителя Р _{н.макс}	Одной фазы	20,0 кВт
	Трёх фаз	100 кВт

Важно отметить, что проведение прямых измерений в действующих сетях возможно не во всех эксплуатационных режимах из-за их опасности для оборудования, а в отдельных случаях – для людей и животных. При использовании же компьютерных моделей сетей таких ограничений нет, что открывает широкие огромные возможности для исследования поведения режимных параметров сети при независимом изменении нагрузок её отдельных фаз и других факторов, таких как величина сопротивлений заземляющих устройств подстанций $R_{з.тп}$, потребителей $R_{з.п}$, повторных заземлителей $R_{п}$, обрывы фазных проводов как в отдельности, так и совместное, замыкания фазных проводов между собой, место возникновения в сети указанных видов повреждений, наличие параллельно работающих ВЛ, подключённых к одному трансформатору и т.д.

2.3 Разработка компьютерной модели

Процесс исследования режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ аналитическим методом в выбранных точках является сложной и трудоемкой задачей, так как в нашем случае мы рассматриваем множество режимов электрической сети, каждый из которых описывается своими уравнениями состояния сети. С этой целью была разработана компьютерная модель электрической сети 10/0,38 кВ.

Электрическая схема сети 10/0,38 кВ, на основе которой была создана компьютерная модель, представлена на рисунке 2.1

Компьютерная модель создана с использованием пакета Simulink в программном комплексе MATLAB, который является мощным и универсальным

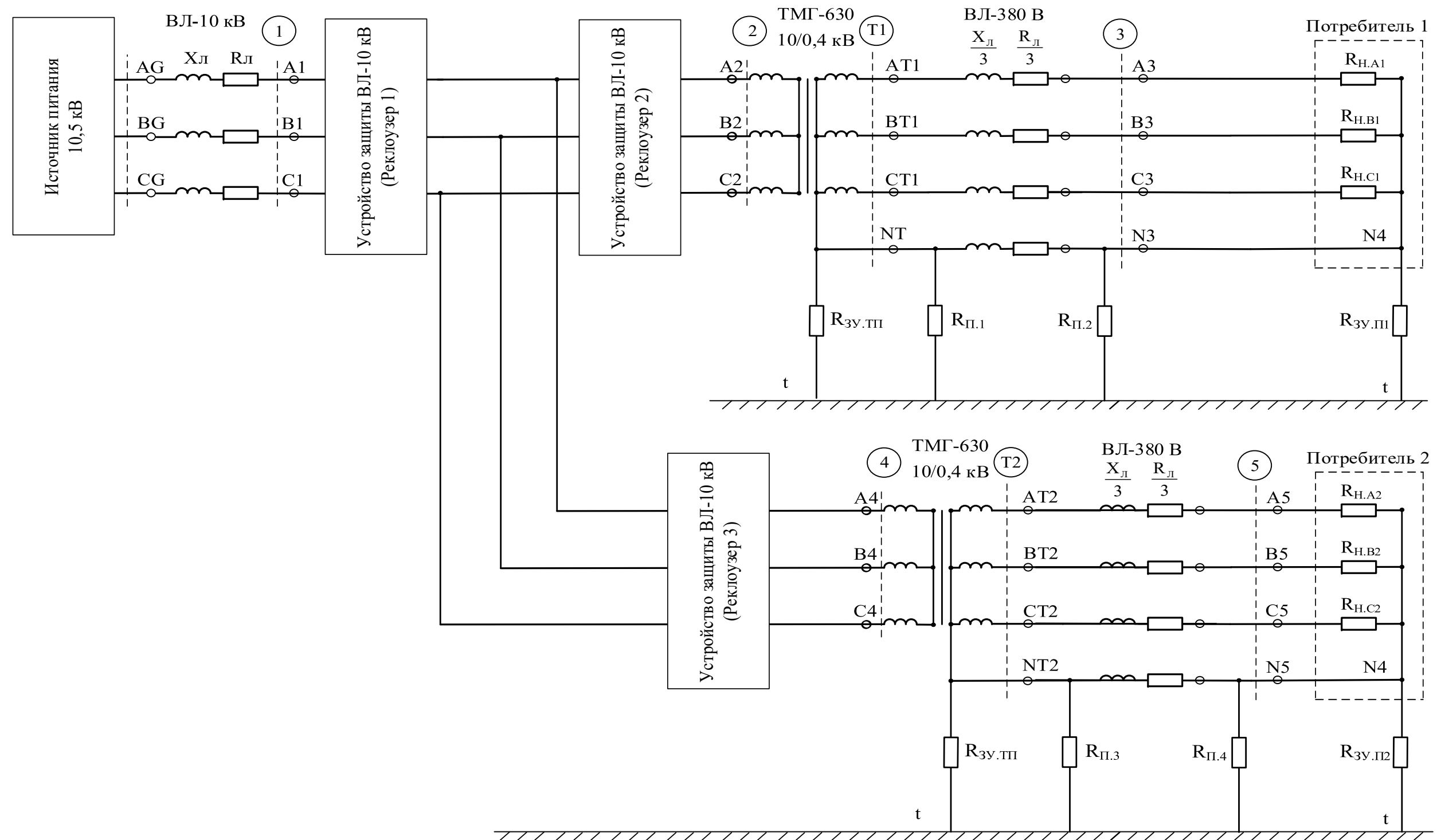


Рисунок 2.1 – Схема исследования для разработки компьютерной модели силовых трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_n

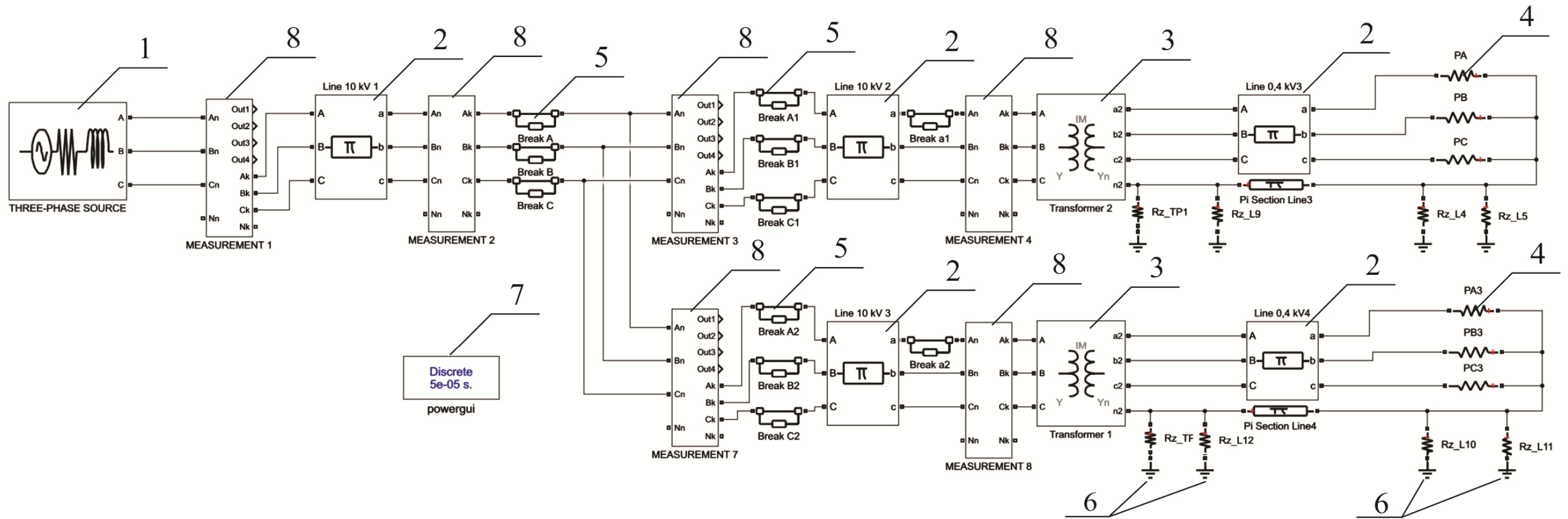


Рисунок 2.2 – Компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ

- 1 – Three-Phase Source – моделирует трёхфазный источник питания;
- 2 – Three-Phase PI Section Line и PI Section Line – моделирует трёхфазную и однофазную линию с сосредоточенными параметрами;
- 3 – Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings) – моделирует трёхфазный двухобмоточный трансформатор с различной конфигурацией обмоток и геометрией магнитопровода;
- 4 – Parallel RLC Load – моделирует нагрузочную ветвь;
- 5 – Breaker – моделирует обрыв фазы линии;
- 6 – Series RLC Branch – моделирует последовательную RLC-цепь (в данной модели используется для моделирования активного сопротивления различного рода заземляющих устройств);
- 7 – Powergui – является инструментом графического интерфейса.

средством решения задач, возникающих в различных областях человеческой деятельности. При проведении исследования на компьютерной модели имеется возможность варьировать параметры электрической сети (мощности трансформатора, загрузка фаз и др.) в широком диапазоне, моделируя сеть в том числе и с предельными техническими параметрами. Компьютерная модель предоставляет огромные возможности для исследования. С помощью этой модели мы можем моделировать такие режимы, которые достаточно сложно организовать в реальной электрической сети, и которые небезопасны для людей и животных, находящихся вблизи с воздушной линии. Такими режимами могут быть обрывы проводов как ВЛ 6–10 кВ, так и ВЛ-380 В, различного вида замыканий и др.

За основу компьютерной модели, блоки электрической сети, алгоритмы вычисления и вывода данных, были взяты и доработаны исследования: «Для построения компьютерной модели использованы стандартные блоки библиотеки Simulink: трёхфазный источник питания; трёхфазная линия электропередачи; трёхфазный двухобмоточный трансформатор; нагрузка активного характера; блоки, моделирующие обрыв фазы в трёхфазной сети; дополнительные подсистемы, включающие в себя различные измерительные блоки. Параметры компьютерной модели рассчитаны для среднестатистической электрической сети.». [64]. Подробное описание компьютерной модели приведено в приложении Б

Проведение широких экспериментальных исследований в действующих электрических сетях связано с целым рядом опасностей. Длительный искусственный разрыв фазного провода на несколько минут, необходимых для измерений и получения информации о напряжениях и токах, может вызвать выход из строя электроприёмников. Кроме того, проведение широкомасштабных экспериментов в действующих электрических сетях приведёт к недоотпуску электрической энергии потребителям. Помимо этого, такой аварийный режим работы может привести к возникновению пожара и представляет опасность для жизни.

«Таких опасностей лишена опытная электрическая сеть. На полигоне ОАО «МРСК Урала», расположенном в его филиале «Челябэнерго», разработана и построена опытная электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ. Она питается от действующей подстанции напряжением 110/10 кВ, на которой установлены трансформаторы типа ТМН–6300/110, посредством действующей воздушной линии напряжением 10 кВ, к которой подключена трансформаторная подстанция с понижающим трансформатором ТМГ–160/10 и воздушная линия напряжением 380 В». Отличительной особенностью данной сети является замена потребителей электрической энергии на нагрузочные сопротивления. Параметры сети (силового трансформатора, воздушных линий, электрических нагрузок и др.) соответствуют действующим электрическим сетям. Обрыв фазного провода производился на участке ВЛ-10 кВ и перед ТП 10/0,4 кВ.

С помощью компьютерной модели проведены исследования параметров электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ при различных режимах её работы, в частности: выявление характерных изменений напряжений, которые могут быть использованы для распознавания режимов работы электрической сети и построения соответствующих устройств защиты.

В нашем исследовании была введена автоматическая система регистрации результатов опыта, которая во много раз уменьшает трудозатраты и увеличивает точность и производительность по обработке данных исследований. Более подробно рассмотрим алгоритм системы записи данных на нашем примере.

С целью записи данных, полученных в результате проведения опыта на модели сети в момент его окончания вызывается запуск m-файла Breaks.m. В меню File модели установлено событие при завершении выполнения расчета, либо его остановки пользователем (File – Model Properties – Callbacks – StopFcn).

Исполняемый файл Breaks.m запрашивает у пользователя наименование опыта:
 name = inputdlg({'Наименование опыта'}); % Предлагаем ввести наименование опыта

В случае отсутствия наименования опыта или нажатия кнопки «Отмена» программа сообщает пользователю о том, что данные опыта не записаны, чистит рабочее пространство Matlab и завершает свою работу.

```
if isempty( name ) % Если не введено наименование, сообщить
    h = msgbox( 'Данные не записаны', 'Сообщение' );
```

Если наименование опыта введено, происходит сбор и запись данных в файл net.xls, очистка рабочего пространства.

```
else % Иначе записать полученные данные в файл Breaks.xls
```

```
...
...
...
...
...
...
end
```

```
clear all % Чистим рабочее пространство
```

Опишем процедуру сбора данных и записи в файл. Сначала в переменную workspace записываем все значения переменных в рабочем пространстве Matlab.

```
workspace = whos; % Записываем содержимое рабочего пространства
```

После чего определяем количество осциллографов, которые записывают результаты измерений в процессе опыта в заданные переменные. Соответствующие настройки можно увидеть в свойствах объекта модели «Score» на закладке «History», значение параметра - «Variable name». Для корректной записи в файл имя переменной должно быть вида I1, I2, I3, ..., In, V1, V2, V3, ..., Vn, где I, V – ток и напряжение, n – номер трансформаторной подстанции. Рабочая область кроме полученных с осциллографов переменных, содержит ещё три служебные переменные, на количество которых мы уменьшим общий результат.

```
wssize = size ( workspace, 1 ) - 3; % Определяем количество осциллографов
```

Для изменения количества снимаемых с осциллографа данных введем переменную value. По заданию снимаются значения шести величин: A, B, C, A1, A2, A0.

```
value = 6; % Количество записываемых величин('A'; 'B'; 'C'; 'A1'; 'A2'; 'A0')
```

Для записи результатов создадим массив ячеек result размерностью value*wssize строк (количество всех измеряемых величин на всех подстанциях) и 6 столбцов (наименование опыта; номер подстанции, ток или напряжение, измеряемая величина(фаза сети), модуль, фаза).

```
result = cell( value*wssize, 6 ); % Создаем массив для записи результатов изме-
рений
```

В цикле последовательно записываем значения со всех осциллографов.

```
for wssc = 1 : wssize % Записываем результаты со всех осциллографов
```

Из переменной workspace берем имя переменной очередного осциллографа.

```
scope = eval ( [ 'workspace(', num2str( wssc ), ',1).name' ]); % Имя осциллографа I1,
I2, V1, V2 и т.д.
```

Записываем во второй и третий столбцы массива ячеек result номера подстанций и тип измеряемых величин в количестве value строк. Во избежание наложения, начальная строка записи принимает значение, зависящее от этапа цикла wssc.

```
result( value*( wssc - 1 ) + ( 1 : value ), 2 ) = ...
```

```
{deal( str2double( scope( 2 )))}; % Записываем порядковый номер подстанции
```

```
result( value*( wssc - 1 ) + ( 1 : value ), 3 ) = {deal( scope( 1 ))}; % Записываем V
или I
```

Затем в пятый и шестой столбец массива result записываем значения модулей и углов фаз сети A, B, C. Они могут быть считаны из переменных рабочего пространства вида In, Vn(последние значения переменных, например I1.signals(1, 1).values(end, :) – последние значения модуля и фазы в осциллографе I1).

```
for ABC = 1 : 3 % Записываем модули и фазы A, B, C
```

```
result( value*( wssc - 1 ) + ABC, 5 : 6 ) = num2cell( eval...
```

```
( [ scope, '.signals( 1,', num2str( ABC ), ').values( end, : )' ])); % RMS & angle A,
B, C
```

```
end
```

Практически аналогично считываются значения для прямого, обратного и нулевого следования фаз. В связи с тем, что в модели на осциллографы сигналы всех последовательностей для модулей и фаз подаются отдельно, запись выполняется двумя командами (для модулей и фаз), по три значения в каждой.

```
result( value*( wssc - 1 ) + ( 4 : 6 ), 5 ) = num2cell(eval...
```

```
( [ scope, '.signals( 1, 4 ).values( end, : )' ])); % Записываем модули RMS A1, A2,
A0
```

```
result( value*( wssc - 1 ) + ( 4 : 6 ), 6 ) = num2cell(eval...
```

```
( [ scope, '.signals( 1, 5 ).values( end, : )' ])); % Записываем фазы angle A1, A2,
A0
```

После цикла записи значений во все ячейки первого столбца массива result записывается наименование опыта, а в четвертый столбец, циклично скопированные обозначения фаз.

```
result( : , 1 ) = deal( name( 1 ) ); % Записываем наименование опыта
```

```
result( : , 4 ) = repmat( {'A';'B';'C';'A1';'A2';'A0'}, wssize, 1 ); % Записываем обо-
значения фаз
```

Итогом работы программы является добавление массива result в конец файла Net.xls. С целью определения начальной строки для записи массива, считаем файл и определим его размер.

```
[ ndata ] = xlsread('Net.xls', 1 ); % Читаем файл net.xls
```

```
n = size( ndata, 1 ); % Смотрим количество записанных строк
```

Зная первую не занятую строку, мы можем записать данные без наложения в область равную содержимому массива result.

```
xlswrite( 'Net.xls', result, 1, [ 'A', num2str( n + 1 ), ':F',...
    num2str( n + value*wssize ) ] ); % Дописываем опыт в net.xls
```

После записи файла проверяем результат. В случае успешной записи выводим сообщение с подтверждением.

```
status = xlswrite( 'Net.xls', result , 1, [ 'A', num2str( n + 1 ), ':F',...
    num2str( n + value*wssize ) ] ); % Проверяем запись
if status % Сообщить если файл записан
    h = msgbox( 'Данные записаны', 'Сообщение' );
end
```

Итогом работы программы является файл формата .xls, содержащий результаты моделирования электрической сети, в удобном для последующего анализа виде.

2.4 Вывод по разделу 2

Проведенный анализ литературных источников по методам исследования информационных параметров электрических сетей при обрывах фазных проводов ВЛ-10 кВ привел нас к тому, что выбранный для исследования метод симметричных составляющих является одним из фундаментальных при проведении подобных исследований, а также при использовании данного метода упрощается расчет рассматриваемых несимметричных режимов 3-х фазной сети.

Приведены исходные положения для проведения исследований электрической сети 10/0,38 кВ, а также параметры моделируемой нами системы. Составлена электрическая схема для ее реализации в программной среде MATLAB, выбраны технические параметры исследуемой сети, например, мощность трансформатора, сечение воздушных линий и т.д. Более подробное описание компьютерной модели представлено в приложении Б.

Разработан алгоритм автоматической записи данных исследований токов и напряжений, который, с одной стороны, значительно упрощает работу по систематизации полученных результатов в соответствии с выбранным режимом исследования электрической сети 10/0,38 кВ, с другой стороны, разработанный алгоритм позволяет получить большой объем данных.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,38 кВ

3.1 Описание исследуемых режимов электрической сети 10/0,38 кВ

Основными факторами, влияющими на режим работы электрической сети 10/0,38 кВ являются:

- состояние ВЛ-10 кВ и 380 В. Они могут находиться в нормальном режиме работы, в линиях могут происходить обрывы фазных и нулевого проводов, а также могут возникать различные виды замыканий;
- изменение несимметрии фазных нагрузок потребителей 380 В.

Сведем перечень исследуемых режимов работы электрической сети напряжением 10/0,38 кВ в таблицу 3.1.

Отметим, что нагрузка потребителей 380 В в исследуемых режимах изменялась в каждой фазе: $P_A = \text{var}$, $P_B = \text{var}$, $P_C = \text{var}$. При исследовании были учтены следующие четыре предельных варианта изменения несимметрии нагрузки потребителей напряжением 380 В по фазам:

- 1 $P_A = P_B = P_C = 100\%$ – симметричная фазная нагрузка;
- 2 $P_A = 0\%$, $P_B = P_C = 100\%$ – нагрузка отсутствует в фазе А;
- 3 $P_A = P_B = 0\%$, $P_C = 100\%$ – нагрузка отсутствует в двух фазах А и В;
- 4 $P_A = P_B = P_C = 0\%$ – нагрузка отсутствует во всех фазах ВЛ-380 В – «холостой ход».

При обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ происходит искажение векторной диаграммы линейных и фазных напряжений, исчезает ток повреждённой фазы и изменяются токи в здоровых фазах – это может быть использовано для построения защиты при обрыве фазного провода.

Кроме того, могут быть использованы следующие информационные параметры [37]:

- фазные токи, протекающие в ВЛ-10 кВ;
- ток обратной последовательности, возникающий в ВЛ-10 кВ ;
- линейные и фазные напряжения, измеряемые в электрической сети 10 кВ и в сети 380 В;
- напряжения нулевой и обратной последовательностей, возникающие в электрической сети 10 кВ и в сети 380 В.

Защиты, реагирующие на изменения информационных параметров при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ могут устанавливаться в четырёх характерных точках электрической сети напряжением 10/0,38 кВ (рисунок 3.1):

- со стороны источника питания (точка 1) – до места обрыва провода ВЛ 6–10 кВ;
- в конце ВЛ 6–10 кВ (точка 2) – после места обрыва провода ВЛ 6–10 кВ, на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора Т;
- на стороне низшего напряжения силового трансформатора Т (точка 3);
- в конце ВЛ-380 В, на вводе у потребителей электроэнергии напряжением 380 В (точка 4).

Защиты, реагирующие на изменения информационных параметров при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ могут устанавливаться в четырёх характерных точках электрической сети напряжением 10/0,38 кВ:

- со стороны источника питания (точка 1) – до места обрыва провода ВЛ 6–10 кВ;
- в конце ВЛ 6–10 кВ (точка 2) – после места обрыва провода ВЛ 6–10 кВ, на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора Т;
- на стороне низшего напряжения силового трансформатора Т (точка 3);
- в конце ВЛ-380 В, на вводе у потребителей электроэнергии напряжением 380 В (точка 4).

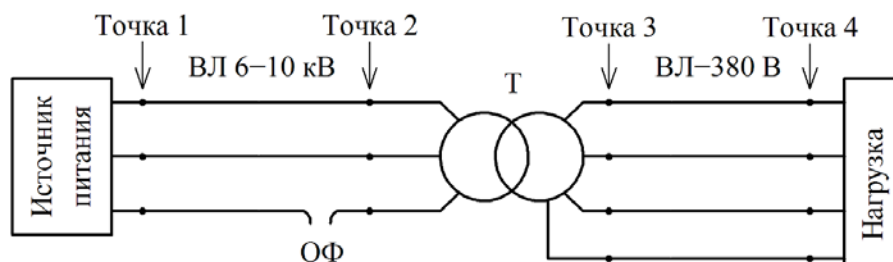


Рисунок 3.1 – Электрическая сеть напряжением 6–10/0,38 кВ

Защиты, устанавливаемые в начале ВЛ-10 кВ или ВЛ-380 В, могут реагировать на изменения токов, а защиты, устанавливаемые после обрыва провода – на изменения напряжений.

Фазные токи, протекающие по ВЛ 6–10 кВ (точки 1 и 2), при нормальном её состоянии представляют собой уравновешенную трёхфазную систему токов, которые примерно равны по величине и сдвинуты на 120 электрических градусов относительно друг друга, их векторная сумма равна нулю. При обрыве фазного провода ВЛ остаются два фазных тока, их величины зависят как от величины питаемой нагрузки 380 В, так и от степени её несимметрии.

Ток обратной последовательности I_2 , измеряемый в точке 1 или 2, определяется параметрами фазных токов.

Фазные и линейные напряжения, а также их симметричные составляющие в точке 1 как при нормальном режиме, так и при обрыве фазного провода остаются без изменений, т. к. они определяются параметрами напряжений трёхфазного источника.

В точках 2, 3 и 4 фазные и линейные напряжения при нормальном режиме работы ВЛ-10 кВ также, как и токи, представляют собой уравновешенную трёхфазную систему напряжений, которые примерно равны по величине и сдвинуты на 120 электрических градусов относительно друг друга, их векторная сумма равна нулю. При обрыве одной из фаз треугольник линейных напряжений искажается, фазные напряжения также подвергаются изменению.

Напряжение нулевой последовательности U_0 наблюдается только в электрической сети 10 кВ. На сторону низшего напряжения понижающего трансформатора Т напряжение U_0 не трансформируется, поэтому в точках 3 и 4 данный параметр отсутствует и не может быть использован для определения обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ. Напряжение обратной последовательности U_2 , появляющееся после об-

рыва фазного провода ВЛ-10 кВ в точке 2, проходит через понижающий трансформатор Т и наблюдается в точках 3 и 4. На токи и напряжения электрической сети 10/0,38 кВ оказывает существенное влияние изменение несимметрии фазных нагрузок потребителей напряжением 380 В. При выборе информационных параметров для построения релейной защиты была также учтена возможность их измерения.

3.2 Исследование изменений токов и напряжений на компьютерной модели

После составления схемы для исследования изменений токов и напряжений электрической сети 10/0,38 кВ была создана ее модель в программной среде Matlab, которая, в свою очередь, позволяет нам детально и подробно рассмотреть различные режимы работы электрической сети 10/0,38 кВ.

Ниже в таблицах 3.2 - 3.25 представлены результаты исследования изменений токов и напряжений на компьютерной модели для различных режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ, проводимые с помощью программной среды Matlab. Номеру исследуемого режима, приведенного в п.3.1 – «Режим 1, Режим 2, и т.д» принадлежат результаты исследований при заданных условиях, приведенные в соответствующей таблице данного пункта.

В таблицах 3.2 - 3.5 представлены результаты исследований электрической сети 10/0,38 кВ для нормального режима работы сети (НР) и различных вариантов нагрузки потребителей 380 В.

В таблицах 3.6 - 3.9 представлены результаты исследований электрической сети 10/0,38 кВ при обрыве фазного провода линии Л1 и различных вариантов нагрузки потребителей 380 В.

В таблицах 3.10 - 3.13 представлены результаты исследований электрической сети 10/0,38 кВ при обрыве фазного провода линии Л2 и различных вариантов нагрузки потребителей 380 В.

В таблицах 3.14 - 3.2.17 представлены результаты исследований электрической сети 10/0,38 кВ при обрыве фазного провода линии Л3 и различных вариантов нагрузки потребителей 380 В.

В таблицах 3.18 - 3.25 представлены результаты исследований электрической сети 10/0,38 кВ при нормальном режиме работы, при обрыве фазного провода линий Л1, Л2, Л3, при различных вариантах нагрузки потребителей 380 В, а также при различных коэффициентах трансформации трансформатора Т2 - 0,7 и 1.

Полученные данные помогут нам провести анализ исследуемых режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ, выявить закономерности и построить характеристики исследуемых информационных параметров.

Таблица 3.2 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{1ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 1: Л1-НР, Л2-НР, Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c ; Кз.т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.т1=1	58,990	58,990	58,990	0,000	1,000	58,990	0		10011,22	10011,22	10011,22	0,00	10011,22	0,00	0,000
ДТ2		39,110	39,110	39,110	0,000	0,663	39,110	0		9918,46	9918,46	9918,46	0,00	9918,00	0,00	0,000
ДТ3		19,880	19,880	19,880	0,000	0,337	19,880	0		9964,54	9964,54	9964,54	0,00	9964,54	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,9	55,360	55,360	55,360	0,000	0,938	55,360	0		10043,20	10043,20	10043,20	0,00	10043,20	0,00	0,000
ДТ2		35,430	35,430	35,430	0,000	0,601	35,430	0		9959,44	9959,44	9959,44	0,00	9954,44	0,00	0,000
ДТ3		19,950	19,950	19,950	0,000	0,338	19,950	0		9996,37	9996,37	9996,37	0,00	9996,37	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,8	51,690	51,690	51,690	0,000	0,876	51,690	0		10075,17	10075,17	10075,17	0,00	10075,17	0,00	0,000
ДТ2		31,690	31,690	31,690	0,000	0,537	31,690	0		10000,45	10000,45	10000,45	0,00	10000,45	0,00	0,000
ДТ3		20,010	20,010	20,010	0,000	0,339	20,010	0		10028,19	10028,19	10028,19	0,00	10028,19	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,7	47,960	47,960	47,960	0,000	0,813	47,960	0		10107,12	10107,12	10107,12	0,00	10107,12	0,00	0,000
ДТ2		27,910	27,910	27,910	0,000	0,473	27,910	0		10041,46	10041,46	10041,46	0,00	10041,46	0,00	0,000
ДТ3		20,070	20,070	20,070	0,000	0,340	20,070	0		10059,99	10059,99	10059,99	0,00	10059,99	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,6	44,210	44,210	44,210	0,000	0,749	44,210	0		10139,02	10139,02	10139,02	0,00	10139,02	0,00	0,000
ДТ2		24,080	24,080	24,080	0,000	0,408	24,080	0		10082,47	10082,47	10082,47	0,00	10082,47	0,00	0,000
ДТ3		20,140	20,140	20,140	0,000	0,341	20,140	0		10091,74	10091,74	10091,74	0,00	10091,74	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,5	40,390	40,390	40,390	0,000	0,685	40,390	0		10170,85	10170,85	10170,85	0,00	10170,85	0,00	0,000
ДТ2		20,200	20,200	20,200	0,000	0,342	20,200	0		10123,43	10123,43	10123,43	0,00	10123,43	0,00	0,000
ДТ3		20,200	20,200	20,200	0,000	0,342	20,200	0		10123,43	10123,43	10123,43	0,00	10123,43	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,4	36,530	36,530	36,530	0,000	0,619	36,530	0		10202,60	10202,60	10202,60	0,00	10202,60	0,00	0,000
ДТ2		16,280	16,280	16,280	0,000	0,276	16,280	0		10164,32	10164,32	10164,32	0,00	10164,32	0,00	0,000
ДТ3		20,260	20,260	20,260	0,000	0,343	20,260	0		10155,03	10155,03	10155,03	0,00	10155,03	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,3	32,630	32,630	32,630	0,000	0,553	32,630	0		10234,24	10234,24	10234,24	0,00	10234,24	0,00	0,000
ДТ2		12,310	12,310	12,310	0,000	0,209	12,310	0		10205,13	10205,13	10205,13	0,00	10205,13	0,00	0,000
ДТ3		20,330	20,330	20,330	0,000	0,345	20,330	0		10186,52	10186,52	10186,52	0,00	10186,52	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,2	28,670	28,670	28,670	0,000	0,486	28,670	0		10265,74	10265,74	10265,74	0,00	10265,74	0,00	0,000
ДТ2		8,296	8,296	8,296	0,000	0,141	8,296	0		10245,81	10245,81	10245,81	0,00	10245,81	0,00	0,000
ДТ3		20,390	20,390	20,390	0,000	0,346	20,390	0		10217,87	10217,87	10217,87	0,00	10217,87	0,00	0,000
ДТ1	Кз.т1=0,1	24,680	24,680	24,680	0,000	0,418	24,680	0		10297,08	10297,08	10297,08	0,00	10297,08	0,00	0,000
ДТ2		4,259	4,259	4,259	0,000	0,072	4,259	0		10286,35	10286,35	10286,35	0,00	10286,35	0,00	0,000
ДТ3		20,450	20,450	20,450	0,000	0,347	20,450	0		10249,07	10249,07	10249,07	0,00	10249,07	0,00	0,000

Таблица 3.3 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 2: Л1-НР, Л2-НР, Л3-НР; Нагрузка: P _a = 0, P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	32,900	52,400	54,900	13,160	0,778	45,910	0,287		10252,19	10011,22	10063,23	146,86	10108,34	0,01	0,015
ДТ2		12,980	32,850	36,050	13,170	0,439	25,890	0,509		10225,08	9918,46	9990,44	185,82	10043,79	0,02	0,019
ДТ3		20,270	20,170	19,790	0,291	0,340	20,080	0,014		10204,39	9964,54	10016,30	146,17	10061,20	0,01	0,015
ДТ1	Кз.Т1=0,9	31,850	49,440	51,580	11,850	0,739	43,580	0,272		10260,26	10043,20	10090,10	132,23	10130,75	0,01	0,013
ДТ2		11,840	29,850	32,580	12,040	0,398	23,510	0,512		10235,67	9959,44	10024,42	167,32	10072,47	0,02	0,017
ДТ3		20,300	20,200	19,860	0,262	0,341	20,120	0,013		10212,42	9996,37	10043,05	131,62	10083,51	0,01	0,013
ДТ1	Кз.Т1=0,8	30,750	46,430	48,220	10,540	0,698	41,210	0,256		10268,38	10075,17	10117,08	117,63	10153,20	0,01	0,012
ДТ2		10,660	26,780	29,090	10,710	0,357	21,080	0,508		10246,37	10000,45	10058,56	148,85	10101,24	0,01	0,015
ДТ3		20,320	20,240	19,940	0,233	0,342	20,170	0,012		10220,50	10028,19	10069,91	117,09	10105,85	0,01	0,012
ДТ1	Кз.Т1=0,7	29,610	43,360	44,840	9,236	0,657	38,780	0,238		10276,52	10107,12	10144,10	103,06	10175,64	0,01	0,010
ДТ2		9,942	23,650	25,560	9,384	0,315	18,600	0,505		10257,11	10041,46	10092,77	130,40	10130,02	0,01	0,013
ДТ3		20,350	20,270	20,010	0,204	0,343	20,210	0,010		10228,60	10059,99	10096,79	102,58	10128,20	0,01	0,010
ДТ1	Кз.Т1=0,6	28,430	40,240	41,430	7,930	0,615	36,310	0,218		10284,61	10139,02	10171,07	88,49	10198,04	0,01	0,009
ДТ2		8,193	20,460	22,010	8,058	0,273	16,080	0,501		10267,83	10082,47	10126,97	111,97	10158,77	0,01	0,011
ДТ3		20,370	20,310	20,080	0,175	0,343	20,250	0,009		10236,66	10091,74	10123,65	88,08	10150,48	0,01	0,009
ДТ1	Кз.Т1=0,5	27,200	37,060	38,000	6,624	0,573	33,790	0,196		10292,60	10170,85	10197,94	73,91	10220,33	0,01	0,007
ДТ2		6,914	17,200	18,440	6,731	0,229	13,510	0,498		10278,44	10123,43	10161,05	93,53	10187,42	0,01	0,009
ДТ3		20,400	20,340	20,160	0,146	0,344	20,300	0,007		10244,61	10123,43	10150,39	73,57	10172,67	0,01	0,007
ДТ1	Кз.Т1=0,4	25,940	33,840	34,550	5,315	0,529	31,230	0,170		10300,41	10202,60	10224,63	59,30	10242,46	0,01	0,006
ДТ2		5,609	13,880	14,850	5,401	0,185	10,910	0,495		10288,87	10164,32	10194,92	75,04	10215,90	0,01	0,007
ДТ3		20,420	20,380	20,230	0,118	0,345	20,340	0,006		10252,38	10155,03	10176,95	59,03	10194,70	0,01	0,006
ДТ1	Кз.Т1=0,3	24,650	30,570	31,080	4,001	0,485	28,640	0,140		10307,97	10234,24	10251,07	44,65	10264,37	0,00	0,004
ДТ2		4,283	10,480	11,240	4,066	0,140	8,269	0,492		10299,02	10205,13	10228,51	56,49	10244,14	0,01	0,006
ДТ3		20,450	20,410	20,300	0,088	0,346	20,390	0,004		10259,90	10186,52	10203,27	44,44	10216,51	0,00	0,004
ДТ1	Кз.Т1=0,2	23,330	27,260	27,610	2,680	0,441	26,000	0,103		10315,18	10265,74	10277,19	29,90	10286,01	0,00	0,003
ДТ2		2,951	7,026	7,630	2,723	0,095	5,599	0,486		10308,78	10245,81	10261,72	37,83	10272,06	0,00	0,004
ДТ3		20,470	20,450	20,370	0,060	0,346	20,430	0,003		10267,08	10217,87	10229,27	29,76	10238,05	0,00	0,003
ДТ1	Кз.Т1=0,1	21,990	23,950	24,120	1,347	0,396	23,340	0,058		10321,97	10297,08	10302,93	15,03	10307,32	0,00	0,001
ДТ2		1,651	3,521	4,021	1,369	0,050	2,926	0,468		10318,05	10286,35	10294,47	19,02	10299,61	0,00	0,002
ДТ3		20,490	20,480	20,440	0,029	0,347	20,470	0,001		10273,84	10249,07	10254,86	14,96	10259,23	0,00	0,001

Таблица 3.4 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 3: Л1-НР, Л2-НР, Л3-НР; Нагрузка: P _c = P _н , P _a = P _b = 0; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	28,160	30,030	45,950	12,690	0,564	33,280	0,381		10328,24	10227,07	10083,85	141,65	10212,56	0,01	0,014
ДТ2		13,630	12,410	26,030	12,900	0,223	13,150	0,981		10326,70	10192,94	10016,92	179,23	10178,06	0,02	0,018
ДТ3		20,260	20,540	20,050	0,281	0,344	20,280	0,014		10280,08	10179,38	10036,83	141,00	10164,94	0,01	0,014
ДТ1	Кз.Т1=0,9	27,460	28,930	43,630	11,520	0,545	32,130	0,359		10328,24	10240,17	10106,91	128,53	10224,70	0,01	0,013
ДТ2		12,440	11,200	23,630	11,700	0,202	11,940	0,980		10326,70	10209,95	10046,02	162,63	10193,57	0,02	0,016
ДТ3		20,280	20,540	20,100	0,255	0,344	20,310	0,013		10280,08	10192,42	10059,79	127,93	10177,03	0,01	0,013
ДТ1	Кз.Т1=0,8	26,740	27,840	41,250	10,320	0,524	30,940	0,334		10328,24	10252,77	10130,42	115,15	10236,81	0,01	0,011
ДТ2		11,210	9,973	21,180	10,490	0,182	10,710	0,979		10326,70	10226,35	10075,72	145,70	10209,06	0,01	0,014
ДТ3		20,300	20,540	20,150	0,228	0,345	20,330	0,011		10280,08	10204,96	10083,18	114,61	10189,08	0,01	0,011
ДТ1	Кз.Т1=0,7	26,010	26,760	38,820	9,098	0,504	29,730	0,306		10328,24	10264,79	10154,32	101,51	10248,89	0,01	0,010
ДТ2		9,969	8,722	18,690	9,244	0,160	9,458	0,977		10326,70	10242,05	10105,94	128,45	10224,49	0,01	0,013
ДТ3		20,330	20,540	20,200	0,202	0,345	20,360	0,010		10280,08	10216,93	10106,97	101,04	10201,07	0,01	0,010
ДТ1	Кз.Т1=0,6	25,270	25,720	36,350	7,854	0,483	28,490	0,276		10328,24	10276,18	10178,58	87,64	10260,81	0,01	0,009
ДТ2		8,702	7,450	16,150	7,980	0,139	8,184	0,975		10326,70	10256,98	10136,64	110,89	10239,80	0,01	0,011
ДТ3		20,350	20,540	20,250	0,174	0,345	20,380	0,009		10280,08	10228,27	10131,11	87,23	10212,96	0,01	0,009
ДТ1	Кз.Т1=0,5	24,510	24,710	33,820	6,590	0,462	27,230	0,242		10328,24	10286,89	10203,13	73,53	10272,62	0,01	0,007
ДТ2		7,414	6,158	13,570	6,695	0,117	6,891	0,972		10326,70	10271,09	10167,74	93,04	10254,96	0,01	0,009
ДТ3		20,380	20,540	20,290	0,146	0,346	20,400	0,007		10280,08	10238,93	10155,55	73,19	10224,72	0,01	0,007
ДТ1	Кз.Т1=0,4	23,750	23,750	31,260	5,306	0,440	25,950	0,204		10328,24	10296,86	10227,92	59,20	10284,25	0,01	0,006
ДТ2		6,105	4,847	10,950	5,391	0,095	5,581	0,966		10326,70	10284,29	10199,18	74,91	10269,92	0,01	0,007
ДТ3		20,400	20,540	20,340	0,118	0,346	20,430	0,006		10280,08	10248,85	10180,23	58,93	10236,30	0,01	0,006
ДТ1	Кз.Т1=0,3	22,980	22,840	28,650	4,003	0,418	24,650	0,162		10328,24	10306,03	10252,90	44,67	10295,67	0,00	0,004
ДТ2		4,779	3,522	8,294	4,068	0,072	4,258	0,955		10326,70	10296,52	10230,88	56,52	10284,62	0,01	0,005
ДТ3		20,430	20,530	20,380	0,088	0,347	20,450	0,004		10280,08	10257,97	10205,09	44,46	10247,66	0,00	0,004
ДТ1	Кз.Т1=0,2	22,200	22,020	26,100	2,684	0,395	23,330	0,115		10328,24	10314,35	10277,99	29,90	10306,84	0,00	0,003
ДТ2		3,437	2,189	5,613	2,727	0,050	2,932	0,930		10326,70	10307,70	10262,76	37,89	10299,02	0,00	0,004
ДТ3		20,460	20,530	20,430	0,059	0,347	20,470	0,003		10280,08	10266,26	10230,07	29,80	10258,78	0,00	0,003
ДТ1	Кз.Т1=0,1	21,420	21,280	23,340	1,349	0,373	21,990	0,061		10328,24	10321,77	10303,13	15,05	10317,70	0,00	0,001
ДТ2		2,083	0,895	2,931	1,371	0,028	1,643	0,834		10326,70	10317,79	10294,73	19,04	10313,06	0,00	0,002
ДТ3		20,480	20,520	20,470	0,030	0,347	20,490	0,001		10280,08	10273,64	10255,09	14,98	10269,59	0,00	0,001

Таблица 3.5 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.т	I_A	I_B	I_C	I_2	$I_1/I_{ном}$	I_1	I_2/I_1		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_2	U_1	U_2/U_1	U_2/U_1
Режим 4: Л1-НР, Л2-НР, Л3-НР; Нагрузка $P_a = P_b = P_c = 0$; Кз.т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.т1=0	20,640	20,640	20,640	0,000	0,350	20,640	0,000		10328,24	10328,24	10328,24	0,00	10328,24	0,00	0,000
ДТ2		0,751	0,751	0,751	0,000	0,013	0,751	0,000		10326,70	10326,70	10326,70	0,00	10326,70	0,00	0,000
ДТ3		20,510	20,510	20,510	0,000	0,348	20,510	0,000		10280,08	10280,08	10280,08	0,00	10280,08	0,00	0,000

#

Таблица 3.6 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 5: Л1-ОФА в конце, Л2-НР;Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c ; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	0,000	51,140	51,030	29,500	0,500	29,490	1,000		10567,17	10011,22	10191,10	329,14	10253,83	0,03	0,032
ДТ2		0,024	33,880	33,860	19,560	0,332	19,560	1,000		4964,38	9918,46	4954,08	4960,00	4959,00	0,47	1,000
ДТ3		0,012	17,230	17,210	9,942	0,168	9,941	1,000		4987,45	9964,54	4977,10	4983,00	4982,00	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,9	0,000	48,000	47,890	27,680	0,469	27,680	1,000		10564,57	10043,20	10209,50	308,93	10270,08	0,03	0,030
ДТ2		0,022	30,690	30,670	17,710	0,300	17,710	1,000		4985,23	9959,44	4974,20	4980,00	4979,00	0,47	1,000
ДТ3		0,012	17,280	17,270	9,974	0,169	9,973	1,000		5003,72	9996,37	4992,65	4999,00	4998,00	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,8	0,000	44,820	44,710	25,850	0,438	25,840	1,000		10561,62	10075,17	10228,29	288,44	10286,32	0,03	0,028
ДТ2		0,021	27,460	27,430	15,850	0,268	15,840	1,001		5006,16	10000,45	4994,29	5001,00	5000,00	0,48	1,000
ДТ3		0,013	17,340	17,320	10,010	0,169	10,000	1,001		5020,05	10028,19	5008,15	5014,00	5014,00	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,7	0,000	41,600	41,490	23,990	0,407	23,990	1,000		10558,29	10107,12	10247,47	267,69	10302,53	0,03	0,026
ДТ2		0,020	24,180	24,160	13,960	0,236	13,950	1,001		5027,15	10041,46	5014,31	5021,00	5020,00	0,48	1,000
ДТ3		0,015	17,390	17,380	10,040	0,170	10,040	1,000		5036,43	10059,99	5023,56	5030,00	5030,00	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,6	0,000	38,340	38,230	22,105	0,375	22,102	1,000		10554,58	10139,02	10267,03	246,67	10318,72	0,02	0,024
ДТ2		0,019	20,860	20,840	12,040	0,204	12,040	1,000		5048,23	10082,47	5034,23	5042,00	5041,00	0,48	1,000
ДТ3		0,016	17,450	17,430	10,070	0,171	10,070	1,000		5052,88	10091,74	5038,86	5046,00	5045,00	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,5	0,000	35,040	34,930	20,198	0,342	20,195	1,000		10550,48	10170,85	10286,97	225,39	10334,86	0,02	0,022
ДТ2		0,017	17,500	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5069,41	10123,43	5054,02	5062,00	5061,00	0,48	1,000
ДТ3		0,017	17,500	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5069,41	10123,43	5054,02	5062,00	5061,00	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,4	0,000	31,690	31,580	18,267	0,310	18,264	1,000		10545,97	10202,60	10307,29	203,85	10350,94	0,02	0,020
ДТ2		0,015	14,100	14,090	8,139	0,138	8,137	1,000		5090,71	10164,32	5073,62	5083,00	5082,00	0,48	1,000
ДТ3		0,019	17,560	17,540	10,130	0,172	10,130	1,000		5086,05	10155,03	5068,97	5078,00	5077,00	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,3	0,000	28,310	28,200	10,314	0,175	10,310	1,000		10541,05	10234,24	10327,99	182,05	10366,95	0,02	0,018
ДТ2		0,013	10,660	10,650	6,154	0,104	6,153	1,000		5112,17	10205,13	5092,95	5103,00	5102,00	0,49	1,000
ДТ3		0,022	17,610	17,590	10,160	0,172	10,160	1,000		5102,85	10186,52	5083,67	5094,00	5093,00	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,2	0,000	24,880	24,780	14,338	0,243	14,334	1,000		10535,70	10265,74	10349,06	160,00	10382,87	0,02	0,015
ДТ2		0,010	7,189	7,179	4,148	0,070	4,147	1,000		5133,88	10245,81	5111,93	5124,00	5122,00	0,49	1,000
ДТ3		0,025	17,670	17,640	10,200	0,173	10,190	1,001		5119,88	10217,87	5097,99	5110,00	5108,00	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т1=0,1	0,000	21,430	21,320	12,340	0,209	12,337	1,000		10529,90	10297,08	10370,50	137,71	10398,70	0,01	0,013
ДТ2		0,006	3,691	3,685	2,130	0,036	2,129	1,000		5155,97	10286,35	5130,38	5144,00	5142,00	0,49	1,000
ДТ3		0,029	17,730	17,700	10,230	0,173	10,220	1,001		5137,28	10249,07	5111,79	5125,00	5124,00	0,49	1,000

Таблица 3.7 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	К _{з.Т1}	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 6: Л1-ОФА в конце, Л2-НР;Л3-НР; Нагрузка: P _a = 0, P _b = P _c = P _н ; К _{з.Т2} = 0,5																
ДТ1	К _{з.Т1} =1	0,000	51,140	51,030	29,500	0,500	29,490	1,000		10567,17	10011,22	10191,10	329,14	10253,83	0,03	0,032
ДТ2		0,024	33,880	33,860	19,560	0,332	19,560	1,000		4964,38	9918,46	4954,08	4960,00	4959,00	0,47	1,000
ДТ3		0,012	17,230	17,210	9,942	0,168	9,941	1,000		4987,45	9964,54	4977,10	4983,00	4982,00	0,47	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,9	0,000	48,000	47,890	27,680	0,469	27,680	1,000		10564,57	10043,20	10209,50	308,93	10270,08	0,03	0,030
ДТ2		0,022	30,690	30,670	17,710	0,300	17,710	1,000		4985,23	9959,44	4974,20	4980,00	4979,00	0,47	1,000
ДТ3		0,012	17,280	17,270	9,974	0,169	9,973	1,000		5003,72	9996,37	4992,65	4999,00	4998,00	0,48	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,8	0,000	44,820	44,710	25,850	0,438	25,840	1,000		10561,62	10075,17	10228,29	288,44	10286,32	0,03	0,028
ДТ2		0,021	27,460	27,430	15,850	0,268	15,840	1,001		5006,16	10000,45	4994,29	5001,00	5000,00	0,48	1,000
ДТ3		0,013	17,340	17,320	10,010	0,169	10,000	1,001		5020,05	10028,19	5008,15	5014,00	5014,00	0,48	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,7	0,000	41,600	41,490	23,990	0,407	23,990	1,000		10558,29	10107,12	10247,47	267,69	10302,53	0,03	0,026
ДТ2		0,020	24,180	24,160	13,960	0,236	13,950	1,001		5027,15	10041,46	5014,31	5021,00	5020,00	0,48	1,000
ДТ3		0,015	17,390	17,380	10,040	0,170	10,040	1,000		5036,43	10059,99	5023,56	5030,00	5030,00	0,48	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,6	0,000	38,340	38,230	22,105	0,375	22,102	1,000		10554,58	10139,02	10267,03	246,67	10318,72	0,02	0,024
ДТ2		0,019	20,860	20,840	12,040	0,204	12,040	1,000		5048,23	10082,47	5034,23	5042,00	5041,00	0,48	1,000
ДТ3		0,016	17,450	17,430	10,070	0,171	10,070	1,000		5052,88	10091,74	5038,86	5046,00	5045,00	0,48	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,5	0,000	35,040	34,930	20,198	0,342	20,195	1,000		10550,48	10170,85	10286,97	225,39	10334,86	0,02	0,022
ДТ2		0,017	17,500	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5069,41	10123,43	5054,02	5062,00	5061,00	0,48	1,000
ДТ3		0,017	17,500	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5069,41	10123,43	5054,02	5062,00	5061,00	0,48	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,4	0,000	31,690	31,580	18,267	0,310	18,264	1,000		10545,97	10202,60	10307,29	203,85	10350,94	0,02	0,020
ДТ2		0,015	14,100	14,090	8,139	0,138	8,137	1,000		5090,71	10164,32	5073,62	5083,00	5082,00	0,48	1,000
ДТ3		0,019	17,560	17,540	10,130	0,172	10,130	1,000		5086,05	10155,03	5068,97	5078,00	5077,00	0,48	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,3	0,000	28,310	28,200	10,314	0,175	10,310	1,000		10541,05	10234,24	10327,99	182,05	10366,95	0,02	0,018
ДТ2		0,013	10,660	10,650	6,154	0,104	6,153	1,000		5112,17	10205,13	5092,95	5103,00	5102,00	0,49	1,000
ДТ3		0,022	17,610	17,590	10,160	0,172	10,160	1,000		5102,85	10186,52	5083,67	5094,00	5093,00	0,49	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,2	0,000	24,880	24,780	14,338	0,243	14,334	1,000		10535,70	10265,74	10349,06	160,00	10382,87	0,02	0,015
ДТ2		0,010	7,189	7,179	4,148	0,070	4,147	1,000		5133,88	10245,81	5111,93	5124,00	5122,00	0,49	1,000
ДТ3		0,025	17,670	17,640	10,200	0,173	10,190	1,001		5119,88	10217,87	5097,99	5110,00	5108,00	0,49	1,000
ДТ1	К _{з.Т1} =0,1	0,000	21,430	21,320	12,340	0,209	12,337	1,000		10529,90	10297,08	10370,50	137,71	10398,70	0,01	0,013
ДТ2		0,006	3,691	3,685	2,130	0,036	2,129	1,000		5155,97	10286,35	5130,38	5144,00	5142,00	0,49	1,000
ДТ3		0,029	17,730	17,700	10,230	0,173	10,220	1,001		5137,28	10249,07	5111,79	5125,00	5124,00	0,49	1,000

Таблица 3.8 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 7: Л1-ОФА в конце, Л2-НР;Л3-НР; Нагрузка: P _c = P _н , P _a = P _b = 0; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	0,000	30,520	30,410	17,580	0,298	17,590	0,999		10532,94	10198,29	10318,29	196,22	10348,90	0,02	0,019
ДТ2		8,494	8,789	17,250	8,316	0,151	8,934	0,931		88613,63	10159,58	1369,23	5393,39	5642,27	0,51	0,956
ДТ3		8,533	21,800	13,290	10,720	0,191	11,250	0,953		8773,84	10150,73	1403,38	5371,46	5640,01	0,51	0,952
ДТ1	Кз.Т1=0,9	0,000	29,610	29,500	17,060	0,289	17,070	0,999		10533,21	10208,91	10323,28	190,36	10354,25	0,02	0,018
ДТ2		7,875	8,158	16,000	7,700	0,141	8,300	0,928		8550,96	10173,17	1633,33	5371,73	5559,17	0,51	0,966
ДТ3		7,914	21,510	13,610	10,680	0,188	11,090	0,963		8512,35	10161,31	1662,15	5350,12	5555,88	0,51	0,963
ДТ1	Кз.Т1=0,8	0,000	28,640	28,530	16,500	0,280	16,510	0,999		10533,34	10220,04	10328,67	184,11	10359,86	0,02	0,018
ДТ2		7,217	7,487	14,670	7,045	0,129	7,626	0,924		8270,78	10187,42	1921,14	5349,48	5478,10	0,51	0,977
ДТ3		7,256	21,200	13,960	10,630	0,185	10,920	0,973		8233,44	10172,39	1944,64	5328,13	5473,61	0,51	0,973
ДТ1	Кз.Т1=0,7	0,000	27,600	27,490	15,900	0,270	15,910	0,999		10533,29	10231,69	10334,51	177,44	10365,73	0,02	0,017
ДТ2		6,515	6,772	13,250	6,346	0,117	6,907	0,919		7971,51	10202,34	2232,12	5326,69	5400,42	0,51	0,986
ДТ3		6,554	20,870	14,320	10,590	0,182	10,760	0,984		7935,52	10183,98	2250,33	5305,54	5394,54	0,51	0,984
ДТ1	Кз.Т1=0,6	0,000	26,490	26,390	15,260	0,259	15,270	0,999		10533,01	10243,87	10340,83	170,31	10371,86	0,02	0,016
ДТ2		5,766	6,010	11,740	5,601	0,104	6,139	0,912		7651,42	10217,96	2566,67	5303,45	5327,87	0,51	0,995
ДТ3		5,804	20,520	14,720	10,540	0,180	10,620	0,992		7616,87	10196,10	2579,53	5282,42	5320,37	0,50	0,993
ДТ1	Кз.Т1=0,5	0,000	25,310	25,200	14,580	0,247	14,580	1,000		10532,48	10256,59	10347,70	162,67	10378,28	0,02	0,016
ДТ2		4,965	5,197	10,120	4,804	0,090	5,319	0,903		7308,62	10234,29	2925,73	5279,85	5262,62	0,50	1,003
ДТ3		5,003	20,140	15,140	10,490	0,178	10,480	1,001		7275,62	10208,77	2933,15	5258,85	5253,26	0,50	1,001
ДТ1	Кз.Т1=0,4	0,000	24,030	23,930	13,840	0,235	13,850	0,999		10531,63	10269,87	10355,17	154,47	10384,97	0,01	0,015
ДТ2		4,108	4,328	8,393	3,953	0,075	4,441	0,890		6941,06	10251,36	3310,72	5256,07	5207,38	0,50	1,009
ДТ3		4,145	19,740	15,590	10,450	0,176	10,370	1,008		6909,72	10221,99	3312,53	5234,97	5195,86	0,50	1,008
ДТ1	Кз.Т1=0,3	0,000	22,670	22,560	13,060	0,221	13,060	1,000		10530,40	10283,70	10363,29	145,68	10391,95	0,01	0,014
ДТ2		3,188	3,401	6,541	3,041	0,059	3,501	0,869		6546,56	10269,16	3723,33	5232,31	5165,42	0,50	1,013
ДТ3		3,226	19,300	16,080	10,400	0,174	10,280	1,012		6517,00	10235,75	3719,32	5210,97	5151,45	0,50	1,012
ДТ1	Кз.Т1=0,2	0,000	21,200	21,090	12,210	0,207	12,210	1,000		10528,73	10298,06	10372,14	136,24	10399,19	0,01	0,013
ДТ2		2,202	2,418	4,560	2,067	0,042	2,494	0,829		6122,82	10287,68	4165,56	5208,85	5140,71	0,50	1,013
ДТ3		2,238	18,830	16,600	10,350	0,173	10,220	1,013		6095,18	10250,04	4155,47	5187,08	5123,96	0,49	1,012
ДТ1	Кз.Т1=0,1	0,000	19,620	19,520	11,300	0,192	11,300	1,000		10526,51	10312,93	10381,79	126,01	10406,69	0,01	0,012
ДТ2		1,141	1,403	2,456	1,040	0,024	1,421	0,732		5667,57	10306,88	4639,65	5186,04	5137,90	0,49	1,009
ДТ3		1,177	18,330	17,150	10,300	0,173	10,210	1,009		5641,99	10264,84	4623,16	5163,63	5118,04	0,49	1,009

Таблица 3.9 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.т	I_A	I_B	I_C	I_2	$I_1/I_{1ном}$	I_1	I_2/I_1		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_2	U_1	$U_2/U_д$	U_2/U_1
Режим 8: Л1-ОФА в конце, Л2-НР;Л3-НР; Нагрузка: $P_a = P_b = P_c = 0$; $Kз.т_2 = 0,5$																
ДТ1	Кз.т1=0	0,000	17,930	17,830	10,320	0,175	10,320	1,000		10523,66	10328,24	10392,31	115,20	10414,41	0,01	0,011
ДТ2		0,001	0,651	0,649	0,375	0,006	0,375	1,000		5178,69	10326,70	5148,02	5164,36	5162,35	0,49	1,000
ДТ3		0,030	17,280	17,750	10,260	0,174	10,250	1,001		5155,31	10280,08	5124,78	5141,04	5139,05	0,49	1,000

#

Таблица 3.10 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 9: Л1-НР;Л2-ОФА в конце;Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	20,520	52,520	51,690	19,247	0,674	39,746	0,484		10375,49	10011,22	10132,81	214,78	10172,03	0,02	0,021
ДТ2		0,000	33,870	33,870	19,560	0,332	19,560	1,000		4959,23	9918,46	4959,23	4959,00	4959,00	0,47	1,000
ДТ3		20,530	20,290	19,800	0,426	0,342	20,200	0,021		10327,11	9964,54	10085,56	213,80	10124,60	0,02	0,021
ДТ1	Кз.Т1=0,9	20,520	49,390	48,680	17,430	0,643	37,940	0,459		10372,80	10043,20	10151,37	194,53	10188,19	0,02	0,019
ДТ2		0,000	30,680	30,680	17,710	0,300	17,710	1,000		4979,72	9959,44	4979,72	4980,00	4980,00	0,47	1,000
ДТ3		20,530	20,320	19,870	0,386	0,343	20,230	0,019		10324,43	9996,37	10104,04	193,62	10140,68	0,02	0,019
ДТ1	Кз.Т1=0,8	20,520	46,230	45,630	15,600	0,612	36,100	0,432		10369,75	10075,17	10170,31	174,02	10204,33	0,02	0,017
ДТ2		0,000	27,450	27,450	15,850	0,269	15,850	1,000		5000,22	10000,45	5000,22	5000,00	5000,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,340	19,940	0,345	0,344	20,270	0,017		10321,40	10028,19	10122,89	173,21	10156,75	0,02	0,017
ДТ1	Кз.Т1=0,7	20,520	43,040	42,550	13,730	0,580	34,240	0,401		10366,33	10107,12	10189,63	153,25	10220,44	0,01	0,015
ДТ2		0,000	24,170	24,170	13,950	0,236	13,950	1,000		5020,73	10041,46	5020,73	5021,00	5021,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,360	20,010	0,304	0,344	20,300	0,015		10317,99	10059,99	10142,12	152,53	10172,79	0,01	0,015
ДТ1	Кз.Т1=0,6	20,520	39,840	39,430	11,850	0,548	32,360	0,366		10362,52	10139,02	10209,33	132,21	10236,52	0,01	0,013
ДТ2		0,000	20,850	20,850	12,040	0,204	12,040	1,000		5041,23	10082,47	5041,23	5041,00	5041,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,390	20,080	0,262	0,345	20,330	0,013		10314,20	10091,74	10161,73	131,60	10188,79	0,01	0,013
ДТ1	Кз.Т1=0,5	20,520	36,630	36,280	9,940	0,516	30,460	0,326		10358,32	10170,85	10229,41	110,92	10252,55	0,01	0,011
ДТ2		0,000	17,490	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5061,71	10123,43	5061,71	5062,00	5062,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,410	20,150	0,220	0,345	20,360	0,011		10310,02	10123,43	10181,71	110,40	10204,75	0,01	0,011
ДТ1	Кз.Т1=0,4	20,520	33,410	33,110	8,010	0,483	28,520	0,281		10353,71	10202,60	10249,86	89,37	10268,52	0,01	0,009
ДТ2		0,000	14,100	14,100	8,138	0,138	8,138	1,000		5082,16	10164,32	5082,16	5082,00	5082,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,430	20,230	0,177	0,346	20,390	0,009		10305,43	10155,03	10202,06	88,96	10220,64	0,01	0,009
ДТ1	Кз.Т1=0,3	20,520	30,200	29,920	6,056	0,450	26,570	0,228		10348,69	10234,24	10270,68	67,58	10284,42	0,01	0,007
ДТ2		0,000	10,660	10,660	6,153	0,104	6,153	1,000		5102,56	10205,13	5102,56	5103,00	5103,00	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,450	20,300	0,134	0,346	20,430	0,007		10300,44	10186,52	10222,79	67,26	10236,46	0,01	0,007
ДТ1	Кз.Т1=0,2	20,520	27,030	26,710	4,082	0,417	24,600	0,166		10343,24	10265,74	10291,87	45,55	10300,23	0,00	0,004
ДТ2		0,000	7,184	7,184	4,148	0,070	4,148	1,000		5122,91	10245,81	5122,91	5123,00	5123,00	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,470	20,370	0,090	0,347	20,460	0,004		10295,01	10217,87	10243,88	45,34	10252,20	0,00	0,004
ДТ1	Кз.Т1=0,1	20,520	23,920	23,490	2,096	0,383	22,600	0,093		10337,35	10297,08	10313,42	23,38	103,15	0,00	0,227
ДТ2		0,000	3,688	3,688	2,130	0,036	2,130	1,000		5143,17	10286,35	5143,17	5143,00	5143,00	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,430	20,450	0,046	0,347	20,490	0,002		10289,15	10249,07	10265,33	23,27	10267,83	0,00	0,002

Таблица 3.11 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 10: Л1-НР;Л2-ОФА в конце;Л3-НР; Нагрузка: P _a = 0, P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	20,520	52,520	51,690	19,247	0,674	39,746	0,484		10375,49	10011,22	10132,81	214,78	10172,03	0,02	0,021
ДТ2		0,000	33,870	33,870	19,560	0,332	19,560	1,000		4959,23	9918,46	4959,23	4959,00	4959,00	0,47	1,000
ДТ3		20,530	20,290	19,800	0,426	0,342	20,200	0,021		10327,11	9964,54	10085,56	213,80	10124,60	0,02	0,021
ДТ1	Кз.Т1=0,9	20,520	49,390	48,680	17,430	0,643	37,940	0,459		10372,80	10043,20	10151,37	194,53	10188,19	0,02	0,019
ДТ2		0,000	30,680	30,680	17,710	0,300	17,710	1,000		4979,72	9959,44	4979,72	4980,00	4980,00	0,47	1,000
ДТ3		20,530	20,320	19,870	0,386	0,343	20,230	0,019		10324,43	9996,37	10104,04	193,62	10140,68	0,02	0,019
ДТ1	Кз.Т1=0,8	20,520	46,230	45,630	15,600	0,612	36,100	0,432		10369,75	10075,17	10170,31	174,02	10204,33	0,02	0,017
ДТ2		0,000	27,450	27,450	15,850	0,269	15,850	1,000		5000,22	10000,45	5000,22	5000,00	5000,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,340	19,940	0,345	0,344	20,270	0,017		10321,40	10028,19	10122,89	173,21	10156,75	0,02	0,017
ДТ1	Кз.Т1=0,7	20,520	43,040	42,550	13,730	0,580	34,240	0,401		10366,33	10107,12	10189,63	153,25	10220,44	0,01	0,015
ДТ2		0,000	24,170	24,170	13,950	0,236	13,950	1,000		5020,73	10041,46	5020,73	5021,00	5021,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,360	20,010	0,304	0,344	20,300	0,015		10317,99	10059,99	10142,12	152,53	10172,79	0,01	0,015
ДТ1	Кз.Т1=0,6	20,520	39,840	39,430	11,850	0,548	32,360	0,366		10362,52	10139,02	10209,33	132,21	10236,52	0,01	0,013
ДТ2		0,000	20,850	20,850	12,040	0,204	12,040	1,000		5041,23	10082,47	5041,23	5041,00	5041,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,390	20,080	0,262	0,345	20,330	0,013		10314,20	10091,74	10161,73	131,60	10188,79	0,01	0,013
ДТ1	Кз.Т1=0,5	20,520	36,630	36,280	9,940	0,516	30,460	0,326		10358,32	10170,85	10229,41	110,92	10252,55	0,01	0,011
ДТ2		0,000	17,490	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5061,71	10123,43	5061,71	5062,00	5062,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,410	20,150	0,220	0,345	20,360	0,011		10310,02	10123,43	10181,71	110,40	10204,75	0,01	0,011
ДТ1	Кз.Т1=0,4	20,520	33,410	33,110	8,010	0,483	28,520	0,281		10353,71	10202,60	10249,86	89,37	10268,52	0,01	0,009
ДТ2		0,000	14,100	14,100	8,138	0,138	8,138	1,000		5082,16	10164,32	5082,16	5082,00	5082,00	0,48	1,000
ДТ3		20,530	20,430	20,230	0,177	0,346	20,390	0,009		10305,43	10155,03	10202,06	88,96	10220,64	0,01	0,009
ДТ1	Кз.Т1=0,3	20,520	30,200	29,920	6,056	0,450	26,570	0,228		10348,69	10234,24	10270,68	67,58	10284,42	0,01	0,007
ДТ2		0,000	10,660	10,660	6,153	0,104	6,153	1,000		5102,56	10205,13	5102,56	5103,00	5103,00	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,450	20,300	0,134	0,346	20,430	0,007		10300,44	10186,52	10222,79	67,26	10236,46	0,01	0,007
ДТ1	Кз.Т1=0,2	20,520	27,030	26,710	4,082	0,417	24,600	0,166		10343,24	10265,74	10291,87	45,55	10300,23	0,00	0,004
ДТ2		0,000	7,184	7,184	4,148	0,070	4,148	1,000		5122,91	10245,81	5122,91	5123,00	5123,00	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,470	20,370	0,090	0,347	20,460	0,004		10295,01	10217,87	10243,88	45,34	10252,20	0,00	0,004
ДТ1	Кз.Т1=0,1	20,520	23,920	23,490	2,096	0,383	22,600	0,093		10337,35	10297,08	10313,42	23,38	103,15	0,00	0,227
ДТ2		0,000	3,688	3,688	2,130	0,036	2,130	1,000		5143,17	10286,35	5143,17	5143,00	5143,00	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,430	20,450	0,046	0,347	20,490	0,002		10289,15	10249,07	10265,33	23,27	10267,83	0,00	0,002

Таблица 3.12 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{НОМ}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 11: Л1-НР;Л2-ОФА в конце;Л3-НР; Нагрузка: P _c = P _н , P _a = P _b = 0; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т1=1	20,520	22,300	19,950	1,433	0,354	20,900	0,069		10320,60	10307,91	10335,58	15,99	10321,35	0,00	0,002
ДТ2		0,000	2,522	2,522	1,456	0,025	1,456	1,000		20016,71	10301,35	9779,20	10741,15	9547,84	1,02	1,125
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,031	0,347	20,500	0,002		10272,48	10259,85	10287,38	15,91	10273,23	0,00	0,002
ДТ1	Кз.Т1=0,9	20,520	22,310	19,970	1,430	0,354	20,910	0,068		10320,69	10307,82	10335,44	15,95	10321,31	0,00	0,002
ДТ2		0,000	2,517	2,517	1,453	0,025	1,453	1,000		19974,86	10301,23	9752,14	10500,20	9477,19	1,00	1,108
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,031	0,347	20,500	0,002		10272,57	10259,76	10287,25	15,88	10273,18	0,00	0,002
ДТ1	Кз.Т1=0,8	20,520	22,320	20,000	1,426	0,355	20,920	0,068		10320,81	10307,72	10335,28	15,91	10321,26	0,00	0,002
ДТ2		0,000	2,510	2,510	1,449	0,025	1,449	1,000		19919,50	10301,09	9717,28	10534,49	9387,89	1,00	1,122
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,030	0,347	20,500	0,001		10272,68	10259,66	10287,08	15,83	10273,13	0,00	0,002
ДТ1	Кз.Т1=0,7	20,520	22,330	20,030	1,421	0,355	20,940	0,068		10320,96	10307,61	10335,06	15,85	10321,20	0,00	0,002
ДТ2		0,000	2,500	2,500	1,444	0,024	1,444	1,000		19843,52	10300,93	9670,83	10575,31	9271,60	1,01	1,141
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,031	0,347	20,500	0,002		10272,84	10259,55	10286,87	15,77	10273,07	0,00	0,002
ДТ1	Кз.Т1=0,6	20,520	22,350	20,070	1,413	0,355	20,960	0,067		10321,17	10307,48	10334,79	15,76	10321,14	0,00	0,002
ДТ2		0,000	2,486	2,486	1,436	0,024	1,436	1,000		19734,18	10300,75	9606,24	10624,10	9114,24	1,01	1,166
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,031	0,347	20,500	0,002		10273,05	10259,42	10286,60	15,69	10273,01	0,00	0,002
ДТ1	Кз.Т1=0,5	20,520	22,370	20,130	1,401	0,356	20,980	0,067		10321,48	10307,35	10334,42	15,63	10321,07	0,00	0,002
ДТ2		0,000	2,465	2,465	1,423	0,024	1,423	1,000		19566,68	10300,56	9511,18	10681,86	8890,30	1,02	1,202
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,031	0,347	20,500	0,002		10273,35	10259,29	10286,23	15,55	10272,95	0,00	0,002
ДТ1	Кз.Т1=0,4	20,520	22,390	20,220	1,381	0,356	21,020	0,066		10321,96	10307,25	10333,89	15,40	10321,02	0,00	0,001
ДТ2		0,000	2,430	2,430	1,403	0,024	1,403	1,000		19827,20	10300,40	9360,01	10746,44	8548,79	1,02	1,257
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,031	0,347	20,500	0,002		10273,83	10259,19	10285,70	15,33	10272,90	0,00	0,001
ДТ1	Кз.Т1=0,3	20,520	22,410	20,350	1,343	0,357	21,070	0,064		10322,77	10307,31	10333,11	14,98	10321,06	0,00	0,001
ДТ2		0,000	2,364	2,364	1,365	0,023	1,365	1,000		18760,05	10300,43	9091,38	10800,34	7973,89	1,03	1,354
ДТ3		20,530	20,470	20,500	0,029	0,347	20,500	0,001		10274,64	10259,25	10284,93	14,91	10272,93	0,00	0,001
ДТ1	Кз.Т1=0,2	20,520	22,390	20,560	1,258	0,358	21,140	0,060		10324,37	10308,13	10331,92	14,03	10321,47	0,00	0,001
ДТ2		0,000	2,213	2,213	1,278	0,022	1,278	1,000		17565,23	10301,37	8529,56	6855,26	10745,92	0,65	0,638
ДТ3		20,530	20,480	20,490	0,027	0,347	20,500	0,001		10276,23	10260,07	10283,75	13,96	10273,34	0,00	0,001
ДТ1	Кз.Т1=0,1	20,520	22,140	20,830	1,005	0,358	21,150	0,048		10327,87	10312,61	10330,66	11,21	10323,70	0,00	0,001
ДТ2		0,000	1,769	1,769	1,021	0,017	1,021	1,000		14038,31	10306,88	7088,51	9972,28	4290,05	0,95	2,325
ДТ3		20,530	20,490	20,500	0,022	0,347	20,500	0,001		10279,71	10264,52	10282,49	11,16	10275,57	0,00	0,001

Таблица 3.13 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{1ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 12: Л1-НР;Л2-ОФА в конце;Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = 0; Кз.т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.т ₁ =0	20,520	20,930	20,300	0,369	0,349	20,580	0,018		10331,01	10328,24	10335,33	4,13	10331,52	0,00	0,000
ДТ2		0,000	0,650	0,650	0,370	0,006	0,370	1,000		5163,35	10326,70	5163,35	5163,35	5163,35	0,49	1,000
ДТ3		20,530	20,510	20,520	0,008	0,348	20,520	0,000		10282,83	10280,08	10287,14	4,11	10283,35	0,00	0,000

#

Таблица 3.14 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 13: Л1-НР;Л2-НР;Л3-ОФА в конце; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	39,730	55,000	54,620	9,630	0,837	49,360	0,195		10193,37	10011,22	10070,33	107,47	10091,35	0,01	0,011
ДТ2		39,740	39,510	39,030	0,410	0,668	39,430	0,010		10098,92	9918,46	9977,02	106,50	9998,00	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,220	17,220	9,942	0,169	9,942	1,000		4982,27	9964,54	4982,27	4982,27	4982,27	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	35,990	51,410	51,020	9,962	0,774	45,680	0,218		10226,42	10043,20	10102,23	108,15	10123,66	0,01	0,011
ДТ2		36,000	35,790	35,350	0,381	0,605	35,710	0,011		10141,13	9959,44	10017,98	107,30	10039,22	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,270	17,270	9,973	0,169	9,973	1,000		4998,18	9996,37	4998,18	4998,18	4998,18	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	32,190	47,770	47,370	9,754	0,711	41,940	0,233		10259,46	10075,17	10134,11	108,84	10155,95	0,01	0,011
ДТ2		32,200	32,020	31,620	0,342	0,542	31,950	0,011		10183,36	10000,45	10058,95	108,03	10080,63	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,330	17,330	10,010	0,170	10,010	1,000		5014,10	10028,19	5014,10	5014,10	5014,10	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	28,350	44,100	43,700	9,810	0,647	38,160	0,257		10292,47	10107,12	10165,95	109,53	10188,21	0,01	0,011
ДТ2		28,360	28,200	27,840	0,302	0,477	28,130	0,011		10225,61	10041,46	10099,92	108,82	10122,03	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,380	17,380	10,040	0,170	10,040	1,000		5029,99	10059,99	5029,99	5029,99	5029,99	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	24,460	40,380	40,000	9,878	0,582	34,330	0,288		10325,43	10139,02	10197,72	110,23	10220,42	0,01	0,011
ДТ2		24,470	24,330	24,020	0,261	0,411	24,270	0,011		10267,84	10082,47	10140,84	109,61	10163,41	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,440	17,440	10,070	0,171	10,070	1,000		5045,87	10091,74	5045,87	5045,87	5045,87	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	20,520	36,630	36,280	9,940	0,516	30,460	0,326		10358,32	10170,85	10229,41	110,92	10252,55	0,01	0,011
ДТ2		20,530	20,410	20,150	0,220	0,345	20,360	0,011		10310,02	10123,43	10181,71	110,40	10204,75	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,490	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5061,71	10123,43	5061,71	5061,71	5061,71	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	16,530	32,840	32,560	10,000	0,450	26,530	0,377		10391,12	10202,60	10260,98	111,62	10284,59	0,01	0,011
ДТ2		16,540	16,450	16,240	0,178	0,278	16,410	0,011		10352,13	10164,32	10222,49	111,20	10246,01	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,550	17,550	10,130	0,172	10,130	1,000		5077,51	10155,03	5077,51	5077,51	5077,51	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	12,500	29,020	28,850	10,060	0,382	22,560	0,446		10423,79	10234,24	10292,43	112,31	10316,51	0,01	0,011
ДТ2		12,510	12,440	12,280	0,135	0,210	12,410	0,011		10394,14	10205,13	10263,15	111,96	10287,16	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,600	17,600	10,160	0,172	10,160	1,000		5093,26	10186,52	5093,26	5093,26	5093,26	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	8,419	25,190	25,180	10,130	0,314	18,550	0,546		10456,33	10265,74	10323,72	113,00	10348,28	0,01	0,011
ДТ2		8,430	8,380	8,270	0,090	0,142	8,362	0,011		10436,03	10245,81	10303,68	112,78	10328,19	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,660	17,660	10,190	0,173	10,190	1,000		5108,94	10217,87	5108,94	5108,94	5108,94	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	4,309	21,360	21,600	10,190	0,246	14,490	0,703		10488,70	10297,08	10354,82	113,69	10379,88	0,01	0,011
ДТ2		4,328	4,304	4,248	0,047	0,073	4,293	0,011		10477,76	10286,35	10344,03	113,58	10369,06	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,710	17,710	10,230	0,173	10,230	1,000		5124,54	10249,07	5124,54	5124,54	5124,54	0,49	1,000

Таблица 3.15 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 14: Л1-НР;Л2-НР;Л3-ОФА в конце; Нагрузка: P _a = 0, P _b = P _c = P _н ; Кз.т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.т ₁ =1	13,150	49,950	53,020	23,150	0,609	35,920	0,644		10439,98	10011,22	10121,20	258,37	10189,14	0,02	0,025
ДТ2		13,190	32,940	36,010	13,240	0,441	26,010	0,509		10412,04	9918,46	10048,44	297,03	10124,10	0,03	0,029
ДТ3		0,000	17,220	17,220	9,942	0,169	9,942	1,000		4982,27	9964,54	4982,27	4982,27	4982,27	0,47	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,9	11,190	47,010	49,600	21,870	0,569	33,560	0,652		10448,57	10043,20	10148,10	244,03	10211,81	0,02	0,024
ДТ2		12,030	29,930	32,540	11,920	0,400	23,620	0,505		10423,23	9959,44	10082,45	278,84	10153,10	0,03	0,027
ДТ3		0,000	17,270	17,270	9,973	0,169	9,973	1,000		4998,18	9996,37	4998,18	4998,18	4998,18	0,48	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,8	10,800	44,010	46,150	20,590	0,528	31,150	0,661		10457,21	10075,17	10175,09	229,73	10234,52	0,02	0,022
ДТ2		10,830	26,860	29,050	10,600	0,359	21,170	0,501		10434,52	10000,45	10116,60	260,96	10182,17	0,02	0,026
ДТ3		0,000	17,330	17,330	10,100	0,171	10,100	1,000		5014,10	10028,19	5014,10	5014,10	5014,10	0,48	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,7	9,560	40,940	42,680	19,310	0,486	28,700	0,673		10465,86	10107,12	10202,11	215,45	10257,22	0,02	0,021
ДТ2		9,594	23,720	25,520	18,690	0,157	9,291	2,012		10445,86	10041,46	10150,81	242,58	10211,25	0,02	0,024
ДТ3		0,000	17,380	17,380	10,040	0,170	10,040	1,000		5029,99	10059,99	5029,99	5029,99	5029,99	0,48	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,6	8,295	37,810	39,190	18,030	0,444	26,200	0,688		10474,46	10139,02	10229,07	201,18	10279,85	0,02	0,020
ДТ2		8,325	20,520	21,980	7,977	0,274	16,150	0,494		10457,17	10082,47	10184,98	224,48	10240,29	0,02	0,022
ДТ3		0,000	17,440	17,440	10,070	0,171	10,070	1,000		5045,87	10091,74	5045,87	5045,87	5045,87	0,48	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,5	6,997	34,610	35,690	16,750	0,401	23,660	0,708		10482,95	10170,85	10255,91	186,90	10302,38	0,02	0,018
ДТ2		7,025	17,260	18,410	6,663	0,230	13,580	0,491		10468,37	10123,43	10219,03	206,36	10269,23	0,02	0,020
ДТ3		0,000	17,490	17,490	10,100	0,171	10,100	1,000		5061,71	10123,43	5061,71	5061,71	5061,71	0,48	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,4	5,671	31,150	32,180	15,470	0,357	21,080	0,734		10491,25	10202,60	10282,54	172,59	10324,73	0,02	0,017
ДТ2		5,699	13,920	14,830	5,346	0,186	10,960	0,488		10479,37	10164,32	10252,85	188,21	10297,98	0,02	0,018
ДТ3		0,000	17,550	17,550	10,130	0,172	10,130	1,000		5077,51	10155,03	5077,51	5077,51	5077,51	0,48	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,3	4,324	28,010	28,660	14,180	0,313	18,450	0,769		10499,28	10234,24	10308,91	158,22	10346,86	0,02	0,015
ДТ2		4,353	10,520	11,230	4,024	0,141	8,307	0,484		10490,07	10205,13	10286,36	169,98	10326,48	0,02	0,016
ДТ3		0,000	17,600	17,600	10,160	0,172	10,160	1,000		5093,26	10186,52	5093,26	5093,26	5093,26	0,49	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,2	2,965	24,600	25,150	12,880	0,268	15,800	0,815		10506,96	10265,74	10334,93	143,75	10368,70	0,01	0,014
ДТ2		2,998	7,048	7,619	2,693	0,095	5,626	0,479		10500,37	10245,81	10319,47	151,62	10354,65	0,01	0,015
ДТ3		0,000	17,660	17,660	10,190	0,173	10,190	1,000		5108,94	10217,87	5108,94	5108,93	5108,93	0,49	1,000
ДТ1	Кз.т ₁ =0,1	1,626	21,120	21,650	11,570	0,222	13,110	0,883		10514,19	10297,08	10360,56	129,16	10390,20	0,01	0,012
ДТ2		1,678	3,533	4,017	1,351	0,050	2,941	0,459		10510,16	10286,35	10352,10	133,10	10382,43	0,01	0,013
ДТ3		0,000	17,710	17,710	10,230	0,173	10,230	1,000		5124,54	10249,07	5124,54	5124,53	5124,53	0,49	1,000

Таблица 3.16 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 15: Л1-НР;Л2-НР;Л3-ОФА в конце; Нагрузка: P _c = P _н , P _a = P _b = 0; Кз.Т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	13,500	29,510	42,710	20,540	0,393	23,180	0,886		10518,21	10229,71	10140,00	229,19	10294,68	0,02	0,022
ДТ2		13,610	12,360	25,970	12,860	0,222	13,110	0,981		10516,64	10196,27	10073,24	265,52	10260,31	0,03	0,026
ДТ3		0,000	17,600	17,600	10,160	0,172	10,160	1,000		5091,01	10182,01	5091,01	5091,01	5091,01	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	12,310	28,320	40,310	19,380	0,373	22,000	0,881		10518,45	10242,58	10163,19	216,23	10306,92	0,02	0,021
ДТ2		12,420	11,160	23,570	11,670	0,202	11,910	0,980		10516,88	10212,99	10102,44	248,90	10275,91	0,02	0,024
ДТ3		0,000	17,620	17,620	10,170	0,172	10,170	1,000		5097,41	10194,82	5097,41	5097,41	5097,41	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	11,090	27,120	37,880	18,210	0,353	20,800	0,875		10518,69	10254,93	10186,82	203,24	10319,13	0,02	0,020
ДТ2		11,200	9,933	21,130	10,460	0,181	10,680	0,979		10517,12	10229,08	10132,24	232,16	10291,49	0,02	0,023
ДТ3		0,000	17,640	17,640	10,180	0,173	10,180	1,000		5103,56	10207,12	5103,56	5103,56	5103,56	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	9,852	25,910	35,400	17,050	0,332	19,570	0,871		10518,94	10266,70	10210,85	190,31	10331,28	0,02	0,018
ДТ2		9,958	8,685	18,640	9,220	0,160	9,434	0,977		10517,38	10244,46	10162,57	215,41	10307,00	0,02	0,021
ДТ3		0,000	17,660	17,660	10,200	0,173	10,200	1,000		5109,42	10218,83	5109,42	5109,42	5109,42	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	8,588	24,690	32,910	15,910	0,311	18,320	0,868		10519,20	10277,84	10235,24	177,53	10343,32	0,02	0,017
ДТ2		8,694	7,417	16,110	7,960	0,138	8,163	0,975		10517,63	10259,08	10193,38	198,75	10322,39	0,02	0,019
ДТ3		0,000	17,680	17,680	10,210	0,173	10,210	1,000		5114,96	10229,92	5114,96	5114,96	5114,96	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	7,304	23,470	30,390	14,790	0,289	17,050	0,867		10519,47	10288,29	10259,92	165,02	10355,23	0,02	0,016
ДТ2		7,409	6,128	13,530	6,679	0,116	6,873	0,972		10517,90	10272,85	10224,60	182,32	10337,63	0,02	0,018
ДТ3		0,000	17,700	17,700	10,220	0,173	10,220	1,000		5120,16	10240,31	5120,16	5120,16	5120,16	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	6,000	22,250	27,870	13,710	0,267	15,750	0,870		10519,74	10297,99	10284,86	152,96	10366,95	0,01	0,015
ДТ2		6,104	4,821	10,920	5,378	0,094	5,567	0,966		10518,17	10285,71	10256,15	166,34	10352,67	0,02	0,016
ДТ3		0,000	17,710	17,710	10,230	0,173	10,230	1,000		5124,98	10249,97	5124,98	5124,98	5124,98	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	4,677	21,040	25,360	12,690	0,245	14,430	0,879		10520,02	10306,88	10309,97	141,55	10378,46	0,01	0,014
ДТ2		4,781	3,498	8,272	4,058	0,072	4,247	0,955		10518,45	10297,59	10287,97	151,09	10367,45	0,01	0,015
ДТ3		0,000	17,730	17,730	10,240	0,174	10,240	1,000		5129,41	10258,82	5129,41	5129,41	5129,41	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	3,338	19,850	22,890	11,750	0,222	13,100	0,897		10520,30	10314,92	10335,20	131,08	10389,72	0,01	0,013
ДТ2		3,442	2,169	5,599	2,721	0,050	2,923	0,931		10518,73	10308,43	10319,98	136,96	10381,92	0,01	0,013
ДТ3		0,000	17,740	17,740	10,240	0,174	10,240	1,000		5133,41	10266,83	5133,41	5133,41	5133,41	0,49	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	1,986	18,680	20,480	10,920	0,199	11,760	0,929		10520,58	10332,06	10360,47	121,89	10400,67	0,01	0,012
ДТ2		2,092	0,879	2,924	1,369	0,028	1,641	0,834		10519,01	10318,15	10352,07	124,48	10396,03	0,01	0,012
ДТ3		0,000	17,750	17,750	10,250	0,174	10,250	1,000		5136,97	10273,93	5136,97	5136,97	5136,97	0,49	1,000

Таблица 3.17 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.т	I_A	I_B	I_C	I_2	$I_1/I_{1ном}$	I_1	I_2/I_1		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_2	U_1	U_2/U_1	U_2/U_1
Режим 16: Л1-НР;Л2-НР;Л3-ОФА в конце; Нагрузка: $P_a = P_b = P_c = 0$; Кз.т ₂ = 0,5																
ДТ1	Кз.т ₁ =1	0,650	17,560	18,190	10,250	0,176	10,400	0,986		10520,87	10328,24	10385,72	114,38	10411,29	0,01	0,011
ДТ2		0,763	0,759	0,749	0,008	0,013	0,757	0,011		10519,30	10326,70	10384,17	114,37	10409,74	0,01	0,011
ДТ3		0,000	17,760	17,760	10,260	0,174	10,260	1,000		5140,04	10280,08	5140,04	5140,04	5140,04	0,49	1,000

#

Таблица 3.18 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 17: Л1-НР;Л2-НР;Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,7																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	66,330	66,330	66,330	0,000	1,000	66,330	0,000		9948,77	9948,77	9948,77	0,00	9948,77	0,00	0,000
ДТ2		38,870	38,870	38,870	0,000	0,586	38,870	0,000		9856,58	9856,58	9856,58	0,00	9856,58	0,00	0,000
ДТ3		27,470	27,470	27,470	0,000	0,414	27,470	0,000		9884,14	9884,14	9884,14	0,00	9884,14	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	62,760	62,760	62,760	0,000	0,947	62,760	0,000		9980,48	9980,48	9980,48	0,00	9980,48	0,00	0,000
ДТ2		35,200	35,200	35,200	0,000	0,531	35,200	0,000		9897,24	9897,24	9897,24	0,00	9897,24	0,00	0,000
ДТ3		27,560	27,560	27,560	0,000	0,416	27,560	0,000		9915,65	9915,65	9915,65	0,00	9915,65	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	59,130	59,130	59,130	0,000	0,892	59,130	0,000		10012,18	10012,18	10012,18	0,00	10012,18	0,00	0,000
ДТ2		31,490	31,490	31,490	0,000	0,475	31,490	0,000		9937,93	9937,93	9937,93	0,00	9937,93	0,00	0,000
ДТ3		27,650	27,650	27,650	0,000	0,417	27,650	0,000		9947,15	9947,15	9947,15	0,00	9947,15	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	55,460	55,460	55,460	0,000	0,837	55,460	0,000		10043,87	10043,87	10043,87	0,00	10043,87	0,00	0,000
ДТ2		23,730	23,730	23,730	0,000	0,358	23,730	0,000		9978,63	9978,63	9978,63	0,00	9978,63	0,00	0,000
ДТ3		27,730	27,730	27,730	0,000	0,418	27,730	0,000		9978,63	9978,63	9978,63	0,00	9978,63	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	51,740	51,740	51,740	0,000	0,780	51,740	0,000		10075,53	10075,53	10075,53	0,00	10075,53	0,00	0,000
ДТ2		23,930	23,930	23,930	0,000	0,361	23,930	0,000		10019,32	10019,32	10019,32	0,00	10019,32	0,00	0,000
ДТ3		27,820	27,820	27,820	0,000	0,420	27,820	0,000		10010,08	10010,08	10010,08	0,00	10010,08	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	47,970	47,970	47,970	0,000	0,724	47,970	0,000		10107,12	10107,12	10107,12	0,00	10107,12	0,00	0,000
ДТ2		20,070	20,070	20,070	0,000	0,303	20,070	0,000		10059,99	10059,99	10059,99	0,00	10059,99	0,00	0,000
ДТ3		27,910	27,910	27,910	0,000	0,421	27,910	0,000		10041,46	10041,46	10041,46	0,00	10041,46	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	44,160	44,160	44,160	0,000	0,666	44,160	0,000		10138,63	10138,63	10138,63	0,00	10138,63	0,00	0,000
ДТ2		16,170	16,170	16,170	0,000	0,244	16,170	0,000		10100,59	10100,59	10100,59	0,00	10100,59	0,00	0,000
ДТ3		28,000	28,000	28,000	0,000	0,422	28,000	0,000		10072,77	10072,77	10072,77	0,00	10072,77	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	40,300	40,300	40,300	0,000	0,608	40,300	0,000		10170,03	10170,03	10170,03	0,00	10170,03	0,00	0,000
ДТ2		12,230	12,230	12,230	0,000	0,184	12,230	0,000		10141,10	10141,10	10141,10	0,00	10141,10	0,00	0,000
ДТ3		28,080	28,080	28,080	0,000	0,424	28,080	0,000		10103,97	10103,97	10103,97	0,00	10103,97	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	36,400	36,400	36,400	0,000	0,549	36,400	0,000		10201,31	10201,31	10201,31	0,00	10201,31	0,00	0,000
ДТ2		8,244	8,244	8,244	0,000	0,124	8,244	0,000		10181,50	10181,50	10181,50	0,00	10181,50	0,00	0,000
ДТ3		28,170	28,170	28,170	0,000	0,425	28,170	0,000		10135,04	10135,04	10135,04	0,00	10135,04	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	32,460	32,460	32,460	0,000	0,490	32,460	0,000		10232,44	10232,44	10232,44	0,00	10232,44	0,00	0,000
ДТ2		4,232	4,232	4,232	0,000	0,064	4,232	0,000		10221,76	10221,76	10221,76	0,00	10221,76	0,00	0,000
ДТ3		28,250	28,250	28,250	0,000	0,426	28,250	0,000		10165,97	10165,97	10165,97	0,00	10165,97	0,00	0,000

Таблица 3.19 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 18: Л1-ОФА в конце; Л2-НР; Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,7																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	0,000	57,500	57,390	33,170	0,500	33,160	1,000		10574,06	9948,77	10153,29	370,12	10221,98	0,04	0,036
ДТ2		0,020	33,670	33,650	19,440	0,293	19,430	1,001		4932,84	9856,58	4923,74	4928,62	4927,95	0,47	1,000
ДТ3		0,014	23,800	23,780	13,740	0,207	13,730	1,001		4946,63	9884,14	4937,51	4942,40	4941,74	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	0,000	54,400	54,290	31,380	0,473	31,380	1,000		10571,64	9980,48	10171,36	350,16	10238,13	0,03	0,034
ДТ2		0,019	30,500	30,480	17,600	0,265	17,600	1,000		4953,45	9897,24	4943,79	4948,95	4948,28	0,47	1,000
ДТ3		0,015	23,870	23,860	13,780	0,208	13,780	1,000		4962,66	9915,65	4952,98	4957,48	4958,16	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	0,000	51,260	51,160	29,570	0,446	29,560	1,000		10568,86	10012,18	10189,82	329,94	10254,27	0,03	0,032
ДТ2		0,018	27,280	27,260	15,750	0,238	15,750	1,000		4974,11	9937,93	4963,81	4969,30	4968,62	0,47	1,000
ДТ3		0,016	23,950	23,930	13,820	0,208	13,820	1,000		4978,73	9947,15	4968,42	4973,91	4973,23	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	0,000	48,080	47,980	23,730	0,358	23,730	1,000		10565,71	10043,87	10208,65	309,46	10270,39	0,03	0,030
ДТ2		0,017	24,030	24,010	13,870	0,209	13,870	1,000		4994,83	9978,63	4983,80	4989,67	4988,96	0,48	1,000
ДТ3		0,017	24,030	24,010	13,870	0,209	13,870	1,000		4994,83	9978,63	4983,80	4989,67	4988,96	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	0,000	44,860	44,760	25,870	0,390	25,870	1,000		10562,20	10075,53	10227,87	288,70	10286,48	0,03	0,028
ДТ2		0,016	20,730	20,710	11,960	0,180	11,960	1,000		5015,60	10019,33	5003,72	5010,03	5009,29	0,48	1,000
ДТ3		0,019	24,100	24,080	13,910	0,210	13,910	1,000		5010,97	10010,08	4999,10	5005,40	5004,67	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	0,000	41,600	41,490	23,990	0,362	23,990	1,000		10558,29	10107,12	10247,47	267,69	10302,53	0,03	0,026
ДТ2		0,014	17,390	17,380	10,040	0,151	10,040	1,000		5036,43	10059,99	5023,56	5030,37	5029,61	0,48	1,000
ДТ3		0,020	24,480	24,160	13,960	0,210	13,950	1,001		5027,16	10041,46	5014,31	5021,11	5020,34	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	0,000	38,300	38,190	22,080	0,333	22,080	1,000		10553,99	10138,63	10267,45	246,42	10318,53	0,02	0,024
ДТ2		0,013	14,010	14,000	8,088	0,122	8,086	1,000		5057,31	10100,59	5043,27	5050,70	5049,88	0,48	1,000
ДТ3		0,022	24,260	24,230	14,000	0,211	14,000	1,000		5043,39	10072,77	5029,38	5036,79	5035,97	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	0,000	34,960	34,850	20,150	0,304	20,150	1,000		10549,27	10170,03	10287,80	224,89	10334,46	0,02	0,022
ДТ2		0,010	10,600	10,590	6,115	0,092	6,114	1,000		5078,28	10141,10	5062,83	5071,00	5070,10	0,48	1,000
ДТ3		0,024	24,330	24,310	14,040	0,212	14,040	1,000		5059,68	10103,97	5044,29	5052,43	5051,53	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	0,000	31,580	31,470	18,200	0,275	18,200	1,000		10544,14	10201,31	10308,53	203,11	10350,32	0,02	0,020
ДТ2		0,008	7,143	7,135	4,122	0,062	4,121	1,000		5099,34	10181,50	5082,17	5091,25	5090,24	0,48	1,000
ДТ3		0,027	24,410	24,380	14,090	0,212	14,080	1,001		5076,07	10135,05	5058,98	5068,02	5067,02	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	0,000	28,160	28,050	16,230	0,245	16,230	1,000		10538,37	10232,44	10329,62	181,10	10366,08	0,02	0,017
ДТ2		0,004	3,668	3,663	2,116	0,032	2,116	1,000		5120,55	10221,76	5101,22	5111,47	5110,29	0,49	1,000
ДТ3		0,031	24,480	24,450	14,130	0,213	14,130	1,000		5092,60	10165,97	5073,37	5083,57	5082,40	0,48	1,000

Таблица 3.20 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 19: Л1-НР; Л2-ОФА в конце; Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,7																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	28,350	59,670	58,660	19,010	0,714	47,330	0,402		10308,90	9948,77	10070,75	212,10	10108,35	0,02	0,021
ДТ2		0,000	33,660	33,660	19,430	0,293	19,430	1,000		4928,29	9856,58	4928,29	4928,28	4928,28	0,47	1,000
ДТ3		28,360	28,030	27,360	0,580	0,421	27,910	0,021		10241,93	9884,14	10005,34	210,72	10042,69	0,02	0,021
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	28,350	56,590	55,740	17,220	0,687	45,550	0,378		10306,34	9980,48	10089,04	192,10	10124,37	0,02	0,019
ДТ2		0,000	30,490	30,490	17,600	0,265	17,600	1,000		4948,62	9897,24	4948,62	4948,61	4948,61	0,47	1,000
ДТ3		28,360	28,060	27,450	0,530	0,422	27,960	0,019		10239,39	9915,65	10023,51	190,85	10058,60	0,02	0,019
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	28,350	53,490	52,770	15,400	0,660	43,740	0,352		10303,43	10012,18	10107,71	171,85	10140,37	0,02	0,017
ДТ2		0,000	27,270	27,270	15,750	0,238	15,750	1,000		4968,96	9937,93	4968,96	4968,96	4968,96	0,47	1,000
ДТ3		28,360	28,100	27,550	0,475	0,422	28,000	0,017		10236,50	9947,15	10042,05	170,73	10074,50	0,02	0,017
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	28,350	50,370	49,780	13,560	0,632	41,900	0,324		10300,15	10043,87	10126,75	151,33	10156,35	0,01	0,015
ДТ2		0,000	24,020	24,020	13,870	0,209	13,870	1,000		4989,32	9978,63	4989,32	4989,31	4989,31	0,48	1,000
ДТ3		28,360	28,130	27,650	0,417	0,423	28,040	0,015		10233,25	9978,63	10060,97	150,35	10090,38	0,01	0,015
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	28,350	47,240	46,760	11,700	0,604	40,040	0,292		10296,50	10075,53	10146,16	130,56	10172,31	0,01	0,013
ДТ2		0,000	20,720	20,720	11,960	0,180	11,960	1,000		5009,66	10019,33	5009,66	5009,66	5009,66	0,48	1,000
ДТ3		28,360	28,160	27,750	0,360	0,424	28,090	0,013		10229,62	10010,08	10080,26	129,71	10106,23	0,01	0,013
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	28,350	44,100	43,700	9,816	0,576	38,160	0,257		10292,47	10107,12	10165,95	109,53	10188,21	0,01	0,011
ДТ2		0,000	17,380	17,380	10,040	0,151	10,040	1,000		5029,99	10059,90	5029,99	5029,99	5029,99	0,48	1,000
ДТ3		28,360	28,200	27,840	0,302	0,424	28,130	0,011		10225,61	10041,46	10099,92	108,82	10122,03	0,01	0,011
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	28,350	40,960	40,620	7,909	0,547	36,260	0,218		10288,03	10138,63	10186,11	88,25	10204,06	0,01	0,009
ДТ2		0,000	14,010	14,010	8,087	0,122	8,087	1,000		5050,29	10100,59	5050,29	5050,29	5050,29	0,48	1,000
ДТ3		28,360	28,230	27,940	0,243	0,425	28,180	0,009		10221,20	10072,77	10119,94	87,68	10137,78	0,01	0,009
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	28,350	37,830	37,510	5,980	0,518	34,330	0,174		10283,18	10170,03	10206,63	66,73	10219,84	0,01	0,007
ДТ2		0,000	10,590	10,590	6,115	0,092	6,115	1,000		5070,55	10141,10	5070,55	5070,55	5070,55	0,48	1,000
ДТ3		28,360	28,260	28,040	0,184	0,426	28,220	0,007		10216,39	10103,97	10140,34	66,30	10153,45	0,01	0,007
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	28,350	34,740	34,390	4,031	0,488	32,370	0,125		10277,92	10201,31	10227,52	44,98	10235,53	0,00	0,004
ДТ2		0,000	7,139	7,139	4,122	0,062	4,122	1,000		5090,75	10181,50	5090,75	5090,75	5090,75	0,48	1,000
ДТ3		28,360	28,290	28,150	0,124	0,426	28,260	0,004		10211,16	10135,05	10161,09	44,69	10169,04	0,00	0,004
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	28,350	31,700	31,260	2,070	0,459	30,400	0,068		10272,22	10232,44	10248,77	23,09	10251,13	0,00	0,002
ДТ2		0,000	3,665	3,665	2,116	0,032	2,116	1,000		5110,88	10221,76	5110,88	5110,88	5110,88	0,49	1,000
ДТ3		28,360	28,310	28,250	0,060	0,427	28,310	0,002		10205,49	10165,97	10182,20	22,94	10184,54	0,00	0,002

Таблица 3.21 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 20: Л1-НР; Л2-НР; Л3-ОФА в конце; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 0,7																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	39,730	61,080	60,490	13,310	0,800	53,030	0,251		10200,62	9948,77	10031,98	148,47	10059,90	0,01	0,015
ДТ2		39,740	39,420	38,750	0,580	0,593	39,300	0,015		10106,09	9856,58	9939,02	147,09	9966,68	0,01	0,015
ДТ3		0,000	23,790	23,790	13,740	0,207	13,740	1,000		4942,07	9884,14	4942,07	4942,07	4942,07	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	35,990	57,550	56,950	13,390	0,745	49,370	0,271		10233,80	9980,48	10063,60	149,40	10092,07	0,01	0,015
ДТ2		36,000	35,710	35,100	0,527	0,537	35,600	0,015		10148,45	9897,24	9979,67	148,18	10007,90	0,01	0,015
ДТ3		0,000	23,870	23,870	13,780	0,208	13,780	1,000		4957,82	9915,65	4957,82	4957,82	4957,82	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	32,190	53,980	53,380	13,480	0,689	45,660	0,295		10266,99	10012,18	10095,20	150,38	10124,22	0,01	0,015
ДТ2		32,200	31,940	31,400	0,473	0,480	31,850	0,015		10190,84	9937,93	10020,32	149,26	10049,14	0,01	0,015
ДТ3		0,000	23,940	23,940	13,820	0,208	13,820	1,000		4973,57	9947,15	4973,57	4973,57	4973,57	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	28,350	50,370	49,780	13,560	0,632	41,900	0,324		10300,15	10043,87	10126,75	151,33	10156,35	0,01	0,015
ДТ2		28,360	28,130	27,650	0,410	0,423	28,040	0,015		10233,25	9978,63	10060,97	150,35	10090,38	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,020	24,020	13,870	0,209	13,870	1,000		4989,32	9978,63	4989,32	4989,32	4989,32	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	24,460	46,730	46,170	13,650	0,575	38,100	0,358		10333,27	10075,53	10158,23	152,29	10188,43	0,01	0,015
ДТ2		24,470	24,270	23,850	0,361	0,365	24,200	0,015		10275,64	10019,33	10101,59	151,44	10131,61	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,090	24,090	13,910	0,210	13,910	1,000		5005,04	10010,08	5005,04	5005,04	5005,04	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	20,520	43,040	42,550	13,730	0,516	34,240	0,401		10366,33	10107,12	10183,63	153,25	10220,44	0,01	0,015
ДТ2		20,530	20,360	20,010	0,304	0,306	20,300	0,015		10317,99	10059,99	10142,12	152,53	10172,79	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,170	24,170	13,950	0,210	13,950	1,000		5020,73	10041,46	5020,73	5020,73	5020,73	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	16,530	39,330	38,930	13,820	0,458	30,340	0,456		10399,29	10138,63	10220,92	154,21	10252,36	0,01	0,015
ДТ2		16,540	16,410	16,120	0,246	0,247	16,360	0,015		10360,27	10100,59	10182,58	153,63	10213,89	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,240	24,240	14,000	0,211	14,000	1,000		5036,38	10072,77	5036,38	5036,38	5036,38	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	12,500	35,590	35,330	13,910	0,398	26,400	0,527		10432,14	10170,03	10252,08	155,17	10284,15	0,01	0,015
ДТ2		12,510	12,410	12,190	0,186	0,187	12,370	0,015		10402,46	10141,10	10222,91	154,72	10254,90	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,320	24,320	14,040	0,212	14,040	1,000		5051,98	10103,97	5051,98	5051,98	5051,98	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	8,419	31,830	31,770	22,410	0,211	13,990	1,602		10464,85	10201,31	10283,07	156,12	10315,81	0,01	0,015
ДТ2		8,430	8,365	8,216	0,126	0,126	8,336	0,015		10444,53	10181,50	10263,11	155,82	10295,78	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,390	24,390	14,080	0,212	14,080	1,000		5067,52	10135,05	5067,52	5067,52	5067,52	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	4,309	28,080	28,300	14,080	0,277	18,380	0,766		10497,39	10232,44	10313,89	157,08	10347,30	0,01	0,015
ДТ2		4,328	4,295	4,218	0,064	0,065	4,280	0,015		10486,45	10221,76	10303,13	156,91	10336,51	0,01	0,015
ДТ3		0,000	24,470	24,470	14,130	0,213	14,130	1,000		5082,99	10165,97	5082,99	5082,99	5082,99	0,48	1,000

Таблица 3.22 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 21: Л1-НР; Л2-НР; Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 1,0																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	77,000	77,000	77,000	0,000	1,000	77,000	0,000		9854,89	9854,89	9854,89	0,00	9854,89	0,00	0,000
ДТ2		38,500	38,500	38,500	0,000	0,500	38,500	0,000		9763,57	9763,57	9763,57	0,00	9763,57	0,00	0,000
ДТ3		38,500	38,500	38,500	0,000	0,500	38,500	0,000		9763,57	9763,57	9763,57	0,00	9763,57	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	73,490	73,490	73,490	0,000	0,954	73,490	0,000		9886,18	9886,18	9886,18	0,00	9886,18	0,00	0,000
ДТ2		34,870	34,870	34,870	0,000	0,453	34,870	0,000		9803,73	9803,73	9803,73	0,00	9803,73	0,00	0,000
ДТ3		38,620	38,620	38,620	0,000	0,502	38,620	0,000		9794,57	9794,57	9794,57	0,00	9794,57	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	69,930	69,930	69,930	0,000	0,908	69,930	0,000		9917,48	9917,48	9917,48	0,00	9917,48	0,00	0,000
ДТ2		31,200	31,200	31,200	0,000	0,405	31,200	0,000		9843,92	9843,92	9843,92	0,00	9843,92	0,00	0,000
ДТ3		38,750	38,750	38,750	0,000	0,503	38,750	0,000		9825,58	9825,58	9825,58	0,00	9825,58	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	66,330	66,330	66,330	0,000	0,861	66,330	0,000		9948,77	9948,77	9948,77	0,00	9948,77	0,00	0,000
ДТ2		27,470	27,470	27,470	0,000	0,357	27,470	0,000		9884,14	9884,14	9884,14	0,00	9884,14	0,00	0,000
ДТ3		38,870	38,870	38,870	0,000	0,505	38,870	0,000		9856,58	9856,58	9856,58	0,00	9856,58	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	62,680	62,680	62,680	0,000	0,814	62,680	0,000		9980,02	9980,02	9980,02	0,00	9980,02	0,00	0,000
ДТ2		23,700	23,700	23,700	0,000	0,308	23,700	0,000		9924,35	9924,35	9924,35	0,00	9924,35	0,00	0,000
ДТ3		38,990	38,990	38,990	0,000	0,506	38,990	0,000		9887,54	9887,54	9887,54	0,00	9887,54	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	58,990	58,990	58,990	0,000	0,766	58,990	0,000		10011,22	10011,22	10011,22	0,00	10011,22	0,00	0,000
ДТ2		19,880	19,880	19,880	0,000	0,258	19,880	0,000		9964,54	9964,54	9964,54	0,00	9964,54	0,00	0,000
ДТ3		39,110	39,110	39,110	0,000	0,508	39,110	0,000		9918,46	9918,46	9918,46	0,00	9918,46	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	55,250	55,250	55,250	0,000	0,718	55,250	0,000		10042,35	10042,35	10042,35	0,00	10042,35	0,00	0,000
ДТ2		16,020	16,020	16,020	0,000	0,208	16,020	0,000		10004,68	10004,68	10004,68	0,00	10004,68	0,00	0,000
ДТ3		39,240	39,240	39,240	0,000	0,510	39,240	0,000		9949,30	9949,30	9949,30	0,00	9949,30	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	51,460	51,460	51,460	0,000	0,668	51,460	0,000		10073,39	10073,39	10073,39	0,00	10073,39	0,00	0,000
ДТ2		12,110	12,110	12,110	0,000	0,157	12,110	0,000		10044,73	10044,73	10044,73	0,00	10044,73	0,00	0,000
ДТ3		39,360	39,360	39,360	0,000	0,511	39,360	0,000		9980,05	9980,05	9980,05	0,00	9980,05	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	47,630	47,630	47,630	0,000	0,619	47,630	0,000		10104,31	10104,31	10104,31	0,00	10104,31	0,00	0,000
ДТ2		8,165	8,165	8,165	0,000	0,106	8,165	0,000		10084,69	10084,69	10084,69	0,00	10084,69	0,00	0,000
ДТ3		39,480	39,480	39,480	0,000	0,513	39,480	0,000		10010,68	10010,68	10010,68	0,00	10010,68	0,00	0,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	43,760	43,760	43,760	0,000	0,568	43,760	0,000		10135,08	10135,08	10135,08	0,00	10135,08	0,00	0,000
ДТ2		4,192	4,192	4,192	0,000	0,054	4,192	0,000		10124,51	10124,51	10124,51	0,00	10124,51	0,00	0,000
ДТ3		39,600	39,600	39,600	0,000	0,514	39,600	0,000		10041,17	10041,17	10041,17	0,00	10041,17	0,00	0,000

Таблица 3.23 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 22: Л1-ОФА в конце; Л2-НР; Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 1,0																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	0,000	66,730	66,630	38,500	0,500	38,500	1,000		10581,70	9854,89	10099,42	429,63	10174,07	0,04	0,042
ДТ2		0,017	33,350	33,340	19,250	0,250	19,250	1,000		4885,66	9763,57	4877,91	4882,09	4881,47	0,46	1,000
ДТ3		0,017	33,350	33,340	19,250	0,250	19,250	1,000		4885,66	9763,57	4877,91	4882,09	4881,47	0,46	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	0,000	63,700	63,590	36,750	0,477	36,740	1,000		10579,50	9886,18	10117,00	410,05	10190,05	0,04	0,040
ДТ2		0,016	30,210	30,190	17,440	0,226	17,440	1,000		4905,94	9803,73	4897,78	4902,18	4901,54	0,47	1,000
ДТ3		0,018	33,460	33,440	19,310	0,251	19,310	1,000		4901,36	9794,57	4893,21	4897,60	4896,97	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	0,000	60,620	60,510	34,970	0,454	34,960	1,000		10576,96	9917,48	10134,96	390,22	10206,02	0,04	0,038
ДТ2		0,015	27,020	27,010	15,600	0,203	15,600	1,000		4926,27	9843,92	4917,66	4922,28	4921,64	0,47	1,000
ДТ3		0,019	33,570	33,550	19,370	0,252	19,370	1,000		4917,09	9825,58	4908,49	4913,11	4912,47	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	0,000	57,500	57,390	33,170	0,431	33,160	1,000		10574,06	9948,77	10153,29	370,12	10221,38	0,04	0,036
ДТ2		0,014	23,800	23,780	13,740	0,178	13,730	1,001		4946,63	9884,14	4937,51	4942,40	4941,73	0,47	1,000
ДТ3		0,020	33,670	33,650	19,440	0,252	19,430	1,001		4932,84	9856,58	4923,74	4928,62	4927,95	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	0,000	54,340	54,230	31,340	0,407	31,340	1,000		10570,80	9980,02	10172,01	349,76	10237,92	0,03	0,034
ДТ2		0,013	20,530	20,520	11,850	0,154	11,850	1,000		4967,03	9924,35	4957,33	4962,52	4961,83	0,47	1,000
ДТ3		0,022	33,780	33,760	19,500	0,253	19,490	1,001		4948,60	9887,54	4938,94	4944,11	4943,43	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	0,000	51,140	51,030	29,500	0,383	29,490	1,000		10567,17	10011,22	10191,10	329,14	10253,82	0,03	0,032
ДТ2		0,012	17,230	17,210	9,942	0,129	9,941	1,000		4987,44	9964,54	4977,10	4982,63	4981,91	0,47	1,000
ДТ3		0,023	33,880	33,860	19,560	0,254	19,560	1,000		4964,38	9918,46	4954,08	4959,58	4958,87	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	0,000	47,900	47,790	27,630	0,359	27,620	1,000		10563,14	10042,35	10210,57	308,27	10269,68	0,03	0,030
ДТ2		0,010	13,880	13,870	8,011	0,104	8,010	1,000		5007,89	10004,68	4996,79	5002,71	5001,95	0,48	1,000
ДТ3		0,025	33,990	33,970	19,620	0,255	19,620	1,000		4980,17	9949,30	4969,13	4975,02	4974,27	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	0,000	44,620	44,510	25,730	0,334	25,730	1,000		10558,72	10073,39	10230,41	287,15	10285,48	0,03	0,028
ДТ2		0,008	10,490	10,490	6,057	0,079	6,056	1,000		5028,35	10044,73	5016,39	5022,77	5021,96	0,48	1,000
ДТ3		0,027	34,100	37,070	19,680	0,256	19,680	1,000		4995,97	9980,05	4984,08	4990,42	4989,61	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	0,000	41,300	41,200	23,820	0,309	23,810	1,000		10553,88	10104,31	10250,62	265,78	10301,21	0,03	0,026
ДТ2		0,006	7,074	7,068	4,083	0,053	4,082	1,000		5048,83	10084,69	5035,86	5042,79	5041,90	0,48	1,000
ДТ3		0,029	34,200	34,170	19,740	0,256	19,740	1,000		5011,78	10010,68	4998,90	5005,78	5004,89	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	0,000	37,950	37,850	21,880	0,284	21,880	1,000		10548,63	10135,08	10271,20	244,19	10316,85	0,02	0,024
ДТ2		0,003	3,632	3,629	2,096	0,027	2,096	1,000		5069,34	10124,51	5055,17	5062,75	5061,75	0,48	1,000
ДТ3		0,032	34,310	34,280	19,800	0,257	19,800	1,000		5027,61	10041,17	5013,56	5021,08	5020,09	0,48	1,000

Таблица 3.24 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 23: Л1-НР; Л2-ОФА в конце; Л3-НР; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 1,0																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	39,730	70,110	69,040	18,650	0,758	58,360	0,320		10208,77	9854,89	9977,21	208,09	10012,53	0,02	0,021
ДТ2		0,000	33,340	33,340	19,250	0,250	19,250	1,000		4881,79	9763,57	4881,79	4881,78	4881,78	0,46	1,000
ДТ3		39,740	39,270	38,350	0,813	0,508	39,120	0,021		10114,17	9763,57	9884,76	206,17	9919,75	0,02	0,021
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	39,730	67,120	66,220	16,890	0,735	56,610	0,298		10206,40	9886,18	9995,09	188,47	10028,33	0,02	0,019
ДТ2		0,000	30,200	30,200	17,440	0,226	17,440	1,000		4901,86	9803,73	4901,86	4901,86	4901,86	0,47	1,000
ДТ3		39,740	39,320	38,490	0,736	0,509	39,180	0,019		10111,82	9794,57	9902,48	186,73	9935,40	0,02	0,019
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	39,730	64,110	63,370	15,110	0,712	54,830	0,276		10203,68	9917,48	10013,35	168,60	10044,12	0,02	0,017
ДТ2		0,000	27,020	27,020	15,600	0,203	15,600	1,000		4921,96	9843,92	4921,96	4921,96	4921,96	0,47	1,000
ДТ3		39,740	39,370	38,620	0,658	0,510	39,240	0,017		10109,13	9825,58	9920,56	167,04	9951,05	0,02	0,017
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	39,730	61,080	60,490	13,310	0,689	53,030	0,251		10200,62	9948,77	10031,98	148,47	10059,90	0,01	0,015
ДТ2		0,000	23,790	23,790	13,740	0,178	13,740	1,000		4942,07	9884,14	4942,07	4942,07	4942,07	0,47	1,000
ДТ3		39,740	39,420	38,750	0,580	0,510	39,300	0,015		10106,10	9856,58	9939,02	147,09	9966,68	0,01	0,015
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	39,730	58,040	57,570	11,480	0,665	51,210	0,224		10197,18	9980,02	10050,97	128,09	10075,64	0,01	0,013
ДТ2		0,000	20,530	20,530	11,850	0,154	11,850	1,000		4962,18	9924,35	4962,18	4962,18	4962,18	0,47	1,000
ДТ3		39,740	39,470	38,890	0,500	0,505	38,890	0,013		10102,69	9887,54	9957,84	126,90	9982,28	0,01	0,013
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	39,730	55,000	54,620	9,630	0,641	49,360	0,195		10193,37	10011,22	10070,33	107,46	10091,35	0,01	0,011
ДТ2		0,000	17,220	17,220	9,942	0,129	9,942	1,000		4982,27	9964,54	4982,27	4982,27	4982,27	0,47	1,000
ДТ3		39,740	39,510	39,030	0,419	0,512	39,430	0,011		10098,92	9918,46	9977,02	106,47	9997,84	0,01	0,011
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	39,730	51,960	51,650	7,760	0,617	47,490	0,163		10189,17	10042,35	10090,06	86,58	10107,00	0,01	0,009
ДТ2		0,000	13,870	13,870	8,010	0,104	8,010	1,000		5002,34	10004,68	5002,34	5002,34	5002,34	0,48	1,000
ДТ3		39,740	39,560	39,170	0,338	1,114	85,780	0,004		10094,76	9949,30	9996,56	85,78	10013,35	0,01	0,009
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	39,730	48,940	48,650	5,867	0,592	45,600	0,129		10184,58	10073,39	10110,15	65,47	10122,59	0,01	0,006
ДТ2		0,000	10,490	10,490	6,057	0,079	6,057	1,000		5022,37	10044,73	5022,37	5022,37	5022,37	0,48	1,000
ДТ3		39,740	39,600	39,310	0,255	0,514	39,550	0,006		10090,21	9980,05	10016,46	64,86	10028,80	0,01	0,006
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	39,730	45,950	45,620	3,955	0,567	43,680	0,091		10179,57	10104,31	10130,59	44,13	10138,10	0,00	0,004
ДТ2		0,000	7,071	7,071	4,083	0,053	4,083	1,000		5042,34	10084,69	5042,34	5042,34	5042,34	0,48	1,000
ДТ3		39,740	39,640	39,450	0,172	0,514	39,610	0,004		10085,25	10010,68	10036,72	43,73	10044,16	0,00	0,004
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	39,730	43,000	42,570	2,030	0,542	41,750	0,049		10174,14	10135,08	10151,40	22,65	10153,52	0,00	0,002
ДТ2		0,000	3,630	3,630	2,096	0,027	2,096	1,000		5062,26	10124,51	5062,26	5062,26	5062,26	0,48	1,000
ДТ3		39,740	39,680	39,590	0,080	0,515	39,670	0,002		10079,87	10041,17	10057,33	22,44	10059,44	0,00	0,002

Таблица 3.25 — Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети 10–0,38 кВ

ДТ	Кз.Т	I _A	I _B	I _C	I ₂	I ₁ /I _{ном}	I ₁	I ₂ /I ₁		U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}	U ₂	U ₁	U ₂ /U _л	U ₂ /U ₁
Режим 24: Л1-НР; Л2-НР; Л3-ОФА в конце; Нагрузка: P _a = P _b = P _c = P _н ; Кз.Т ₂ = 1,0																
ДТ1	Кз.Т ₁ =1	39,730	70,110	69,040	18,650	0,758	58,360	0,320		10208,77	9854,89	9977,21	208,09	10012,53	0,02	0,021
ДТ2		39,740	39,270	38,350	0,813	0,508	39,120	0,021		10114,17	9763,57	9884,75	206,17	9919,75	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,340	33,340	19,250	0,250	19,250	1,000		4881,79	9763,57	4881,79	4881,79	4881,79	0,46	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,9	35,990	66,670	65,600	18,770	0,711	54,730	0,343		10242,15	9886,18	10008,42	209,42	10044,48	0,02	0,021
ДТ2		36,000	35,570	34,740	0,738	0,460	35,430	0,021		10156,73	9803,73	9924,95	207,68	9960,71	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,450	33,450	19,310	0,251	19,310	1,000		4897,29	4794,57	4897,29	4897,28	4897,28	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,8	32,190	63,190	62,140	18,890	0,663	51,060	0,370		10275,53	9917,48	10039,61	210,76	10076,43	0,02	0,021
ДТ2		32,200	31,820	31,070	0,663	0,412	31,700	0,021		10199,32	9843,92	9965,15	209,20	10001,69	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,560	33,560	19,370	0,252	19,370	1,000		4912,79	9825,58	4912,79	4912,79	4912,79	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,7	28,350	59,670	58,660	19,010	0,615	47,330	0,402		10308,90	9948,77	10070,75	212,10	10108,35	0,02	0,021
ДТ2		28,360	28,030	27,360	0,585	0,362	27,910	0,021		10241,93	9884,14	10005,34	210,72	10042,69	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,660	33,660	19,430	0,252	19,430	1,000		4928,29	9856,58	4928,29	4928,29	4928,29	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,6	24,460	56,110	55,180	19,130	0,566	43,560	0,439		10342,23	9980,02	10101,83	213,44	10140,22	0,02	0,021
ДТ2		24,470	24,180	23,600	0,506	0,313	24,080	0,021		10284,54	9924,35	10045,48	212,25	10083,66	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,770	33,770	19,500	0,253	19,500	1,000		4943,77	9887,54	4943,77	4943,77	4943,77	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,5	20,520	52,520	51,690	19,250	0,516	39,750	0,484		10375,49	10011,22	10132,81	214,78	10172,03	0,02	0,021
ДТ2		20,530	20,290	19,800	0,426	0,262	20,200	0,021		10327,11	9964,54	10085,56	213,78	10124,60	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,870	33,870	19,560	0,254	19,560	1,000		4959,23	9918,46	4959,23	4959,23	4959,23	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,4	16,530	48,890	48,210	19,370	0,466	35,880	0,540		10408,68	10042,35	10163,68	216,12	10203,75	0,02	0,021
ДТ2		16,540	16,350	15,950	0,344	0,211	16,280	0,021		10369,63	10004,68	10125,55	215,31	10165,47	0,02	0,021
ДТ3		0,000	33,980	33,980	19,620	0,255	19,620	1,000		4974,65	9949,30	4974,65	4974,65	4974,65	0,47	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,3	12,500	45,240	44,760	19,490	0,415	31,980	0,609		10441,76	10073,39	10194,41	217,46	10235,35	0,02	0,021
ДТ2		12,510	12,360	12,060	0,261	0,160	12,310	0,021		10412,06	10044,73	10165,42	216,84	10206,24	0,02	0,021
ДТ3		0,000	34,080	34,080	19,680	0,256	19,680	1,000		4990,02	9980,05	4990,02	4990,02	4990,02	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,2	8,419	41,570	41,360	19,610	0,364	28,020	0,700		10474,70	10104,31	10224,99	218,80	10266,82	0,02	0,021
ДТ2		8,430	8,334	8,129	0,176	0,108	8,297	0,021		10454,37	10084,69	10205,14	218,38	10246,89	0,02	0,021
ДТ3		0,000	34,190	34,190	19,740	0,256	19,740	1,000		5005,34	10010,68	5005,34	5005,34	5005,34	0,48	1,000
ДТ1	Кз.Т ₁ =0,1	4,309	37,880	38,040	19,730	0,312	24,030	0,821		10507,49	10135,08	10255,38	220,14	10298,13	0,02	0,021
ДТ2		4,328	4,279	4,173	0,091	0,055	4,259	0,021		10496,53	10124,51	10244,68	219,91	10287,39	0,02	0,021
ДТ3		0,000	34,290	34,290	19,800	0,257	19,800	1,000		5020,59	10041,17	5020,59	5020,59	5020,59	0,48	1,000

3.3 Анализ характеристик и оценка возможности их использования для построения релейной защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода

После исследования режимов, обозначенных для моделирования в п.3.1, проведем анализ полученного массива данных компьютерной модели электрической сети 10/0,38 кВ. и построим характеристики необходимые для работы релейной защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода.

При анализе данных исследования и построения характеристик, в первом случае, будем рассматривать в качестве информационного параметра отношение токов I_2/ I_1 , во втором случае, в качестве информационного параметра будем рассматривать ток обратной последовательности I_2 .

3.3.1 Анализ и построение характеристик при выбранном информационном параметре I_2/ I_1

– Рассматриваем обрыв провода в линии Л2 $K_{зТ2}=0,5=const$; Загрузка трансформатора Т1 меняется $K_{зТ1}=0,1-1$ – Рисунок 3.2;

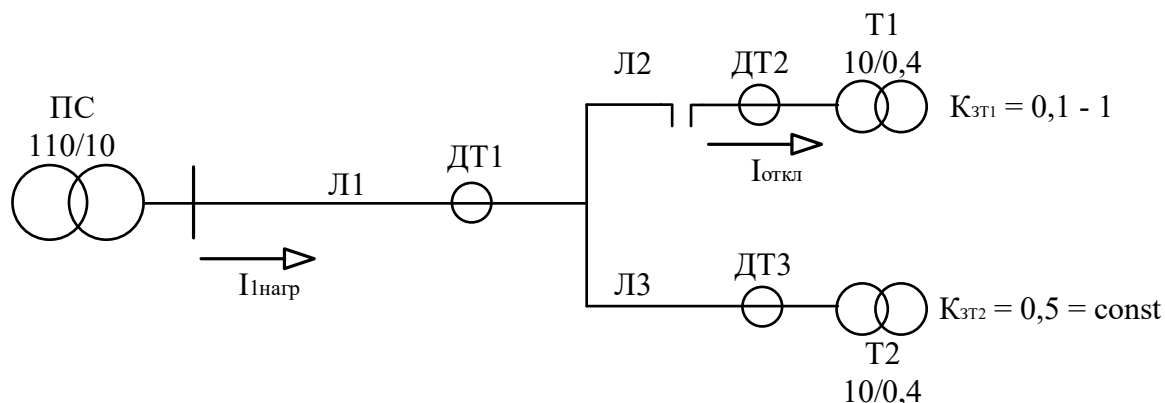


Рисунок 3.2 – Рассматриваемая электрическая сеть 10/0,38 кВ при обрыве фазного провода воздушной линии Л2.

– Рассматриваем обрыв провода линии Л2 при симметричной нагрузке потребителей 380 В, питаемой от трансформаторов Т1 и Т2, где $P_A = P_B = P_C = 100 \%$;

Определяем симметричный ток отключения линии Л2 - $I_{откл}$ в зависимости от коэффициента загрузки первого трансформатора Т1 - $K_{зТ1}$, при различных значениях нагрузки трансформатора Т2 ($K_{зТ2} = 0,5; 0,7; 1,0$).

Результаты исследований сведем в таблицу 3.26. Выборку данных проводим соответственно из таблиц 3.2; 3.18; 3.22.

Таблица 3.26 – Определение исходных данных для построения кривых

$K_{зТ1}$	$I_{откл}, A$			$I_{откл}/ I_{н.}, о.е.$			$I_2/ I_1, о.е.$		
	$K_{зТ2}=0,5$	$K_{зТ2}=0,7$	$K_{зТ2}=1$	$K_{зТ2}=0,5$	$K_{зТ2}=0,7$	$K_{зТ2}=1$	$K_{зТ2}=0,5$	$K_{зТ2}=0,7$	$K_{зТ2}=1$
0,1	4,259	4,232	4,192	0,072	0,064	0,054	0,093	0,068	0,049
0,2	8,296	8,244	8,165	0,141	0,124	0,106	0,166	0,125	0,091
0,3	12,310	12,230	12,110	0,209	0,184	0,157	0,228	0,174	0,129
0,4	16,280	16,170	16,020	0,276	0,244	0,208	0,281	0,218	0,163

КзТ1	I _{откл} , А			I _{откл} / I _{1.н.} , о.е.			I ₂ / I ₁ , о.е.		
	КзТ2=0,5	КзТ2=0,7	КзТ2=1	КзТ2=0,5	КзТ2=0,7	КзТ2=1	КзТ2=0,5	КзТ2=0,7	КзТ2=1
0,5	20,200	20,070	19,880	0,342	0,303	0,258	0,326	0,257	0,195
0,6	24,080	23,930	23,700	0,408	0,358	0,308	0,366	0,292	0,224
0,7	27,910	23,730	27,470	0,473	0,361	0,357	0,401	0,324	0,251
0,8	31,690	31,490	31,200	0,537	0,475	0,405	0,432	0,352	0,276
0,9	35,430	35,200	34,870	0,601	0,531	0,453	0,459	0,378	0,298
1,0	39,110	38,870	38,500	0,663	0,586	0,500	0,484	0,402	0,320

Суммарный ток в начале линии при КзТ1=1 и КзТ2=0,5 представлен в таблице 3.27. (взяты из таблиц 3.2; 3.18; 3.22).

Таблица 3.27 – Суммарный ток в начале линии

I _{нагр} , А	КзТ1	КзТ2
58,99	1,0	0,5
66,33	1,0	0,7
77,00	1,0	1,0

По отношению к этим токам будем рассматривать отношение $I_{откл}/I_{1.н.}$, сводим в 5 колонку таблицы 3.26.

Аналогично делаем выборку тока $I_{откл}$ при КзТ2=0,7 и КзТ1=1, КзТ2=1 и КзТ1=1. Абсолютные значения токов те же (колонка 2, таблица 3.26), а относительные значения $I_{откл}/I_{1.н.}$ вносим в 6 и 7 колонки таблицы 3.26.

При ОФА линии Л2 при КзТ2=0,5 и изменении КзТ1=0,1-1 из таблицы 3.10 делаем выборку отношения I_2/I_1 и вносим в восьмую колонку таблицы 3.26.

Аналогично при КзТ2=0,7, КзТ2 = 1,0 из таблицы 3.20 и изменении КзТ1=0,1-1 из таблицы 3.24 делаем выборку отношения I_2/I_1 , измеряемого в начале Л1 (ДТ1) и вносим в девятую и десятую колонки таблицы 3.26.

По полученным данным строим графики $I_2/I_1 = f(I_{откл})$ для разных значений КзТ2=0,5; 0,7 и 1,0. Построенный график представлен на рисунке 3.3. Также построим дополнительный график с распределением зон чувствительности и нечувствительности на рисунке 3.4.

Определим граничные значения тока $I_{откл.гранич.}$, разделяющего зоны чувствительности и нечувствительности устройства защиты. На этом графике (рисунок 3.3) нанесем ток уставки устройства защиты $(I_2/I_1)_{уст} = 0,2$. При значениях $I_2/I_1 \leq 0,2$ защита не будет чувствовать ОФ. При $I_2/I_1 > 0,2$ находится зона чувствительности устройства защиты.

При пересечении рассматриваемых кривых с линией уставки $(I_2/I_1)_{уст} = 0,2$ определяем граничные условия чувствительности защиты - $I_{откл.гранич.}$.

При КзТ2=0,5 – это $I_{откл.гранич.} = 10,7$ А или $\approx 18\% I_{\Sigma}$;

При КзТ2=0,7 – это $I_{откл.гранич.} = 15,0$ А или $\approx 22\% I_{\Sigma}$;

При КзТ2=1,0 – это $I_{откл.гранич.} = 19,9$ А или $\approx 26\% I_{\Sigma}$.

Можно построить эти кривые в зависимости от относительного тока $(I_2/I_1) = f(I_{откл}/I_{1.н.})$. Построим три кривых по данным из таблицы 3.26. Полученные зависимости представлены на рисунке 3.5.

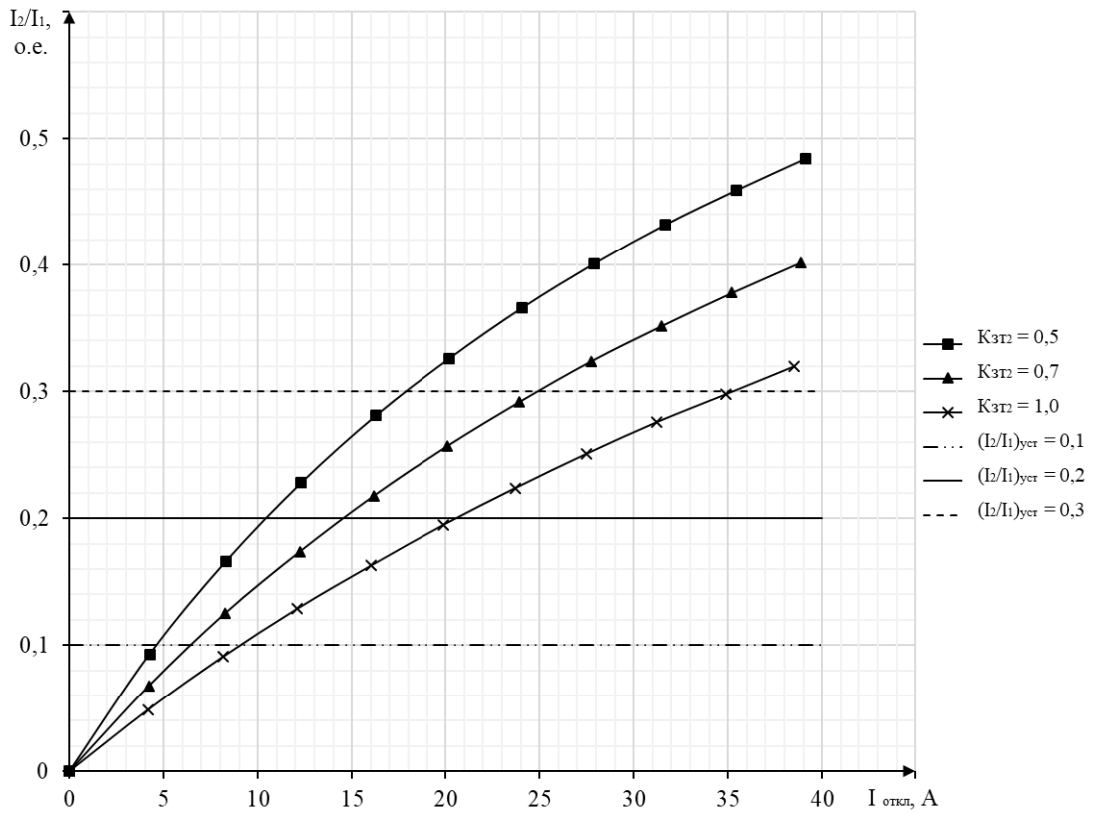


Рисунок 3.3 – Изменение отношения I_2/I_1 в зависимости от тока отключения линии $I_{откл}$

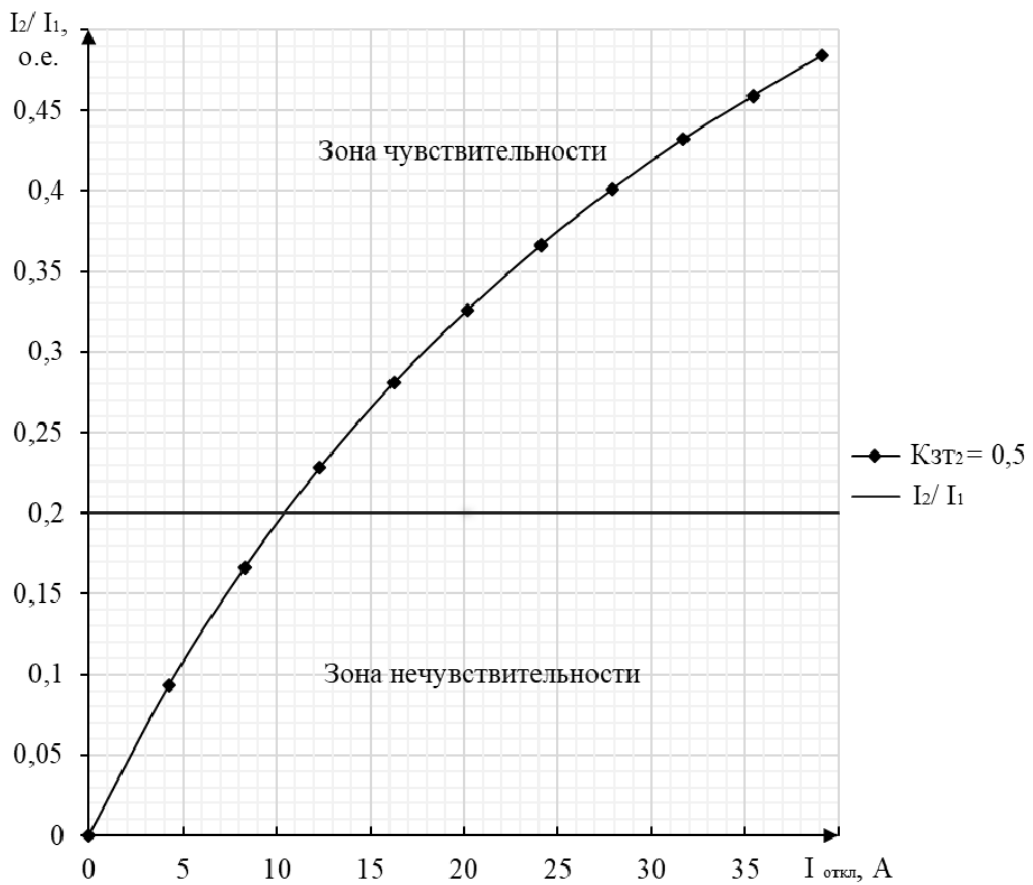


Рисунок 3.4 – Распределение зон защиты ВЛ-10 кВ при выбранном токе уставки устройства защиты $(I_2/I_1)_{уст} = 0,2$ и $K_{зт2} = 0,5$

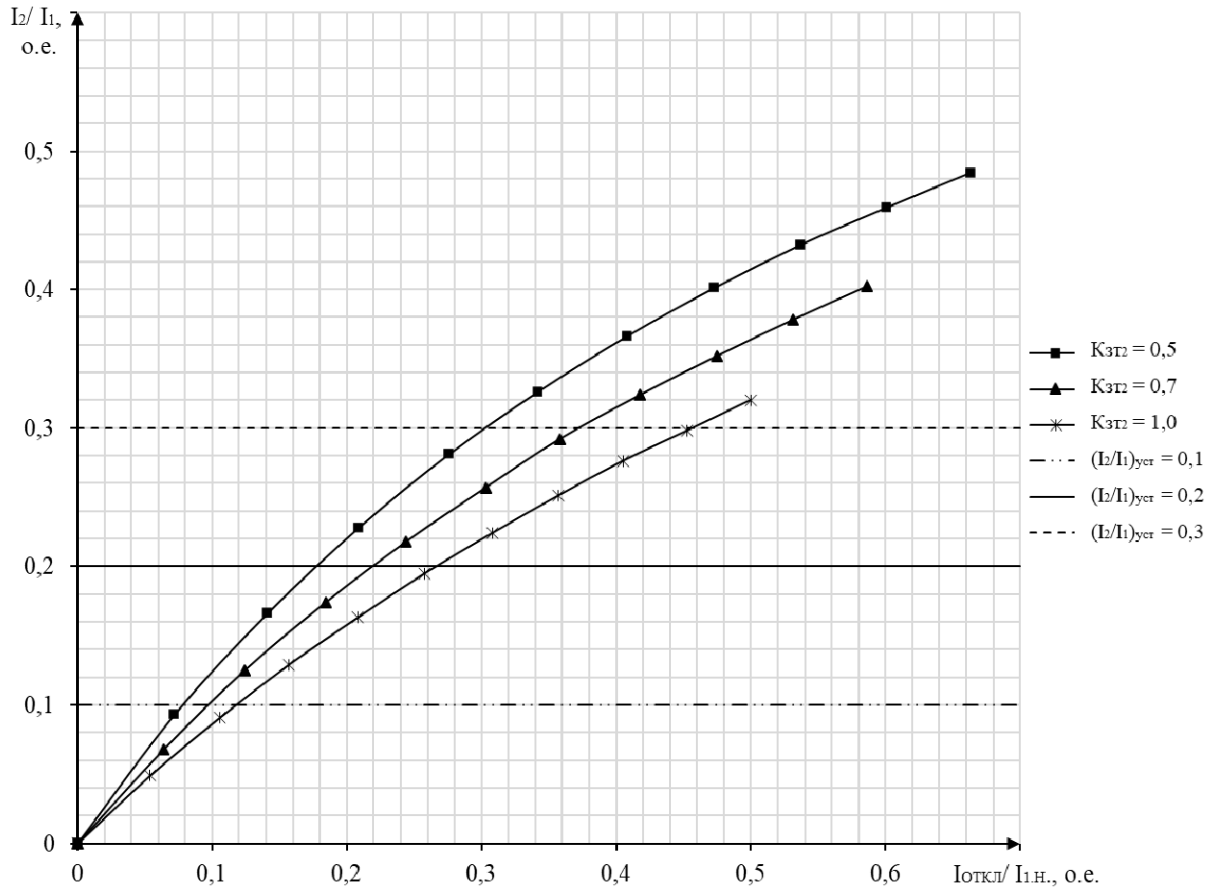


Рисунок 3.5 – Отношение I_2/I_1 в зависимости от $I_{откл}/I_{н.н.}$

По этим кривым также можно определить $I_{откл.гранич}$. Значения токов представлены в таблице 3.28.

Рассмотрим, как изменяются значения граничного тока отключения $I_{откл.гранич}$ в зависимости от передаваемой мощности в начале воздушной линии. Для этого сделаем следующую выборку, которую сведем в таблицу 3.28.

По полученным данным строим зависимость $I_{откл.гранич} = f(S_{1.нагр})$ – рисунок 3.6.

Полученная зависимость показывает, что чем больше нагрузка в начале линии, тем защита, установленная в начале ВЛ1 (А1) имеет большую зону нечувствительности при обрыве провода на конечных участках ВЛ2 и ВЛ3.

Например, $K_{зт1} = 0,1-1$, $K_{зт2}=0,7$ защита, установленная в начале ВЛ начинает чувствовать, если величина тока в ВЛ2 будет превышать 15 А.

Таблица 3.28 – Зависимость граничного тока от передаваемой мощности

$K_{зт1}$	$K_{зт2}$	$I_{откл гр, А}$	$I_{1.нагр, А}$	$S_{1.нагр, МВ \cdot А}$
0,5	1	10,7	58,99	1,073
0,7	1	15	66,33	1,206
1,0	1	19,9	77,00	1,400

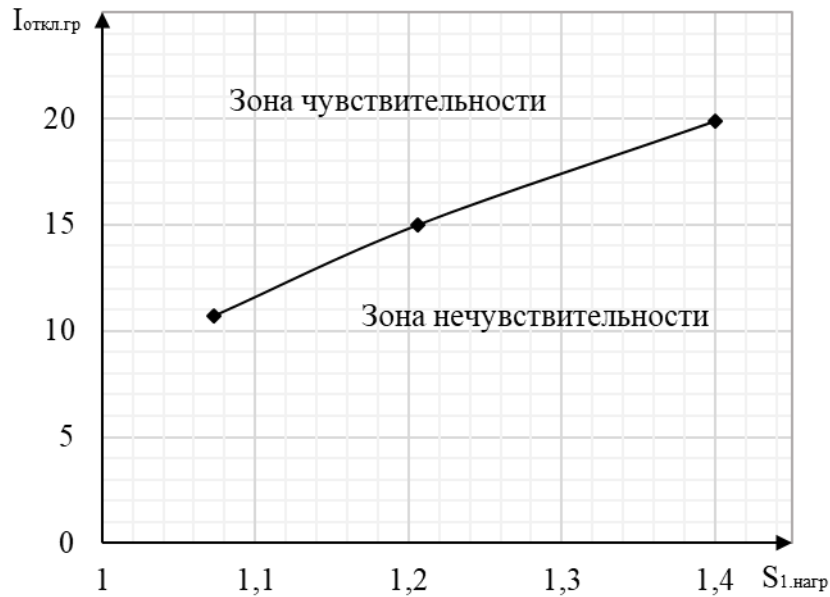


Рисунок 3.6 - Зависимость граничного тока от передаваемой мощности

На рисунке 3.7 видно, что при токах, протекающих по ВЛ2 $I_{T1} = 4,223-15$ А защита, установленная в начале ВЛ1, обрыв провода в ВЛ2 чувствовать не будет. И только при $I_{T1} = 15 - 38,86$ А $> I_{откл.гранич} = 15$ А защита (А1) сможет выявить обрыв провода в ВЛ2.

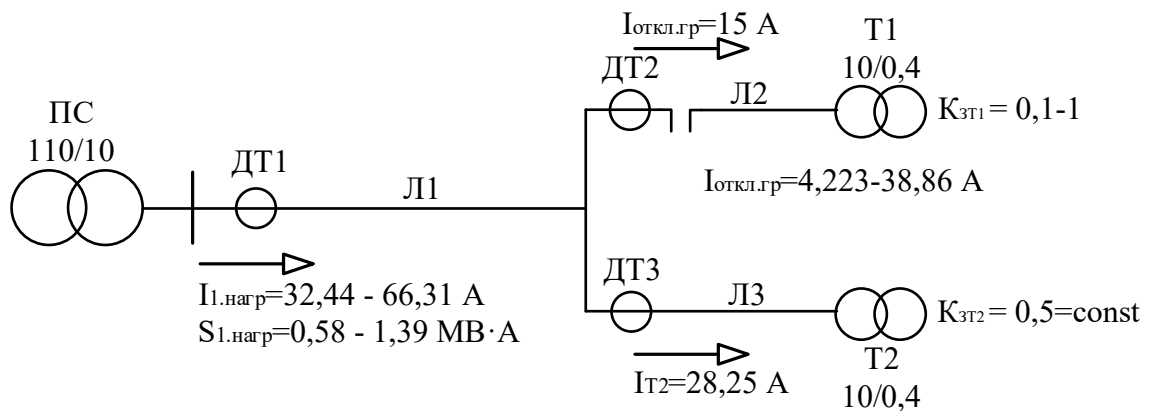


Рисунок 3.7 – Распределение токов в электрической сети 10/0,38 кВ при определении граничного тока.

Данное положение рассмотрено при симметричной нагрузке за трансформаторами Т1 и Т2.

При этом отметим, что защита А2, установленная в начале ВЛ2, будет чувствовать обрыв провода в этой линии. Об этом говорят значение отношений $(I_2/I_1)_{ДТ2}$, которое при любых значениях $K_{зТ1}=0,1-1$ и $K_{зТ2}=0,5; 0,7$ и $1,0$ всегда равны единице. (см. таблицы 3.10; 3.20 и 3.24).

Рассмотрим, как изменяется чувствительность защиты в зависимости от величины уставки устройства защиты. Рассмотрим для трех значений уставок. Выборку сведем в таблицу 3.29.

Таблица 3.29 – Зависимость граничного тока от величины уставки устройства защиты

К _{зт2} , о.е. (при К _{зт1} =1)	I _{1.нагр} , А	(I ₂ /I ₁) _{уст} , о.е.			S _{1.нагр} , МВ·А	I _{1.нагр} , А
		0,1	0,2	0,3		
0,5	58,99	4,1	10,7	17,9	1,073	58,99
0,7	66,33	6,5	15,0	25,0	1,206	66,33
1,0	77,00	9,1	19,9	35,1	1,400	77,00

По полученным данным строим зависимость $I_{откл.гранич} = f(S_{1.нагр})$ – рисунок 3.8.

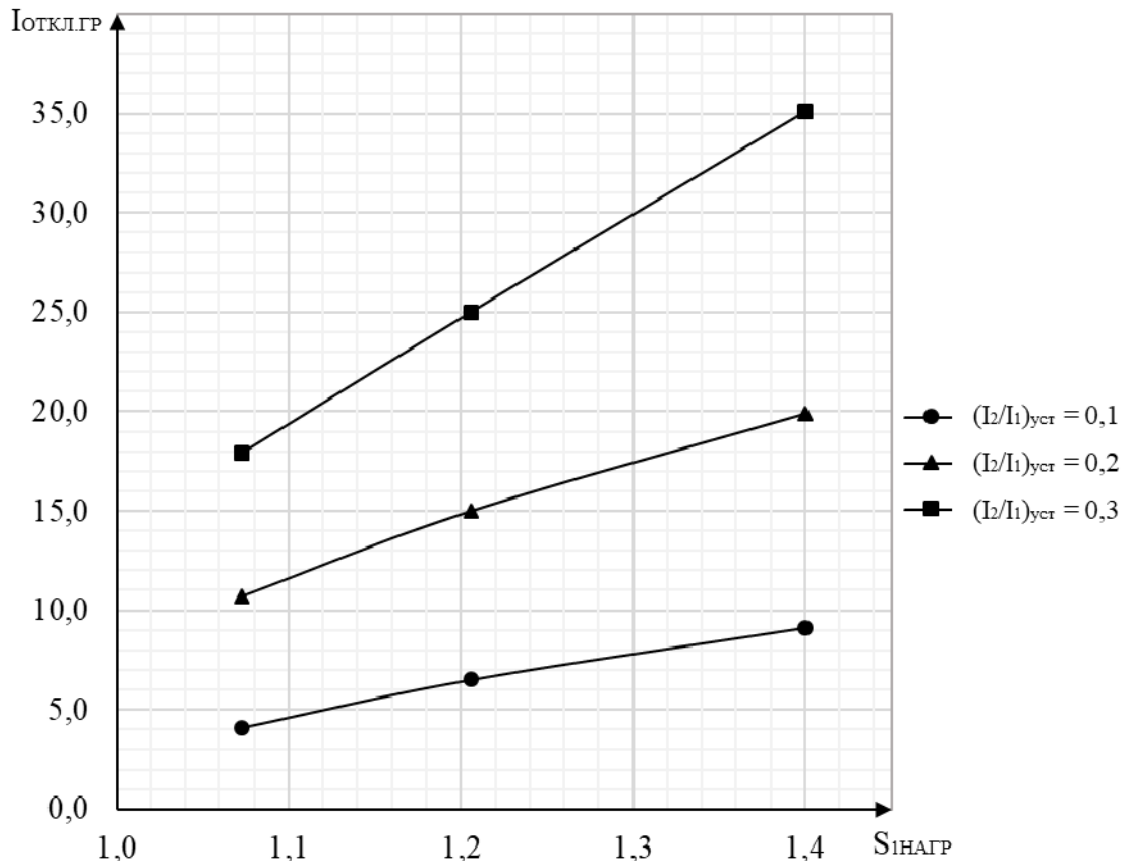


Рисунок 3.8 – Зависимость граничного тока от величины уставки устройства защиты

Сделаем выводы о том, что с изменением величины уставки $(I_2/I_1)_{уст}$, меняется зона нечувствительности устройства защиты. С увеличением уставки – зона нечувствительности возрастает.

Из предыдущего пункта следует, что защита, которая в качестве информационного параметра использует отношение тока обратной последовательности к току прямой последовательности (I_2/I_1) всегда четко будет работать при защите радиальной линии, нагрузка которой сосредоточена в конце этой линии.

Для радиальной ВЛ (рисунок 3.9, а) значение отношения I_2/I_1 при обрыве фазного провода в любой точке равно 1 (рисунок 3.9, б).

При этом отметим дополнительно:

– защита будет выявлять обрывы провода ВЛ 10 кВ в любой точке линии;

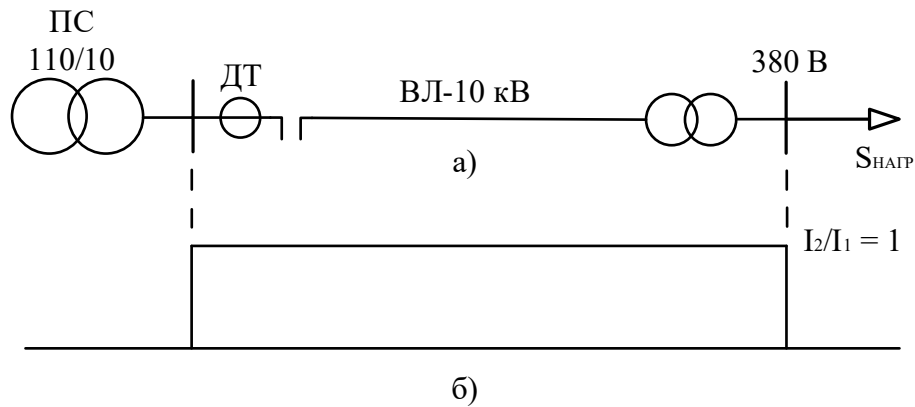


Рисунок 3.9 – Токовая защита радиальной ВЛ, построение на использовании отношения (I_2/I_1)

– защита будет чувствительна независимо от тока нагрузки, она будет срабатывать при любой загрузке трансформатора Т1 - $K_{зТ1}=0,1-1$.

Уставка защиты $(I_2/I_1)_{уст}$ может находиться в пределах от 0 до 1. Но здесь нужно провести дополнительное исследование, связанное с влиянием на отношение I_2/I_1 следующих факторов:

- несимметрии фазной нагрузки потребителей 380 В;
- влияние других видов повреждений, возникающих в электрической сети 10/0,38 кВ. Это различного рода короткие замыкания, возникающие как в сети 10 кВ, так и в сети 380 В.

Если рассмотреть магистральную ВЛ с распределенной нагрузкой по ее длине, то можно показать зоны чувствительности и зоны нечувствительности (рисунок 3.9, а), которые разделены током $I_{откл.гранич}$.

Для магистральной линии (рисунок 3.10, а) с равномерно распределенной нагрузкой значение отношения I_2/I_1 измеренное в начале ВЛ с помощью ДТ1, меняется от 1 до 0 в зависимости от точки обрыва фазного провода (рисунок 3.10, б).

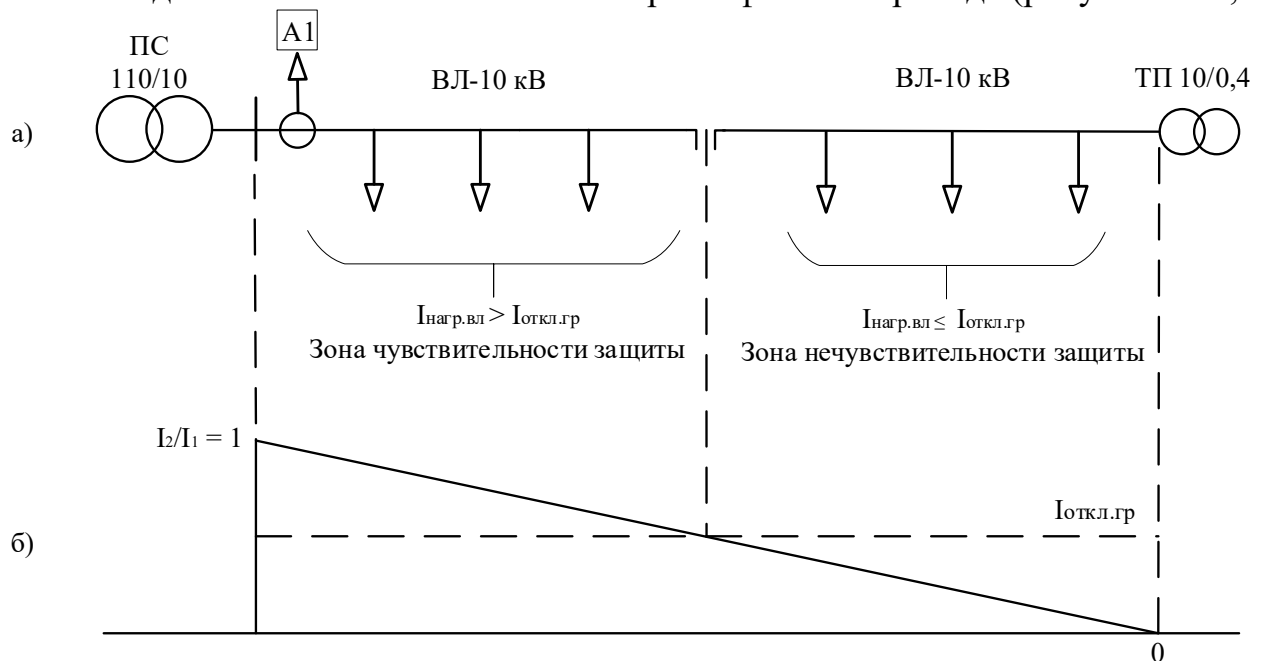


Рисунок 3.10 – Токовая защита магистральной воздушной линии

Рассмотрим возможность защиты отпайки ВЛ 10 кВ (рисунок 3.11). Защита ДТ1 (А1) будет обеспечивать защиту отпайки ВЛ, если ток, протекающий в предполагаемом месте обрыва $I_{\text{нагр.вл.}}$ будет больше $I_{\text{откл.гранич}}$

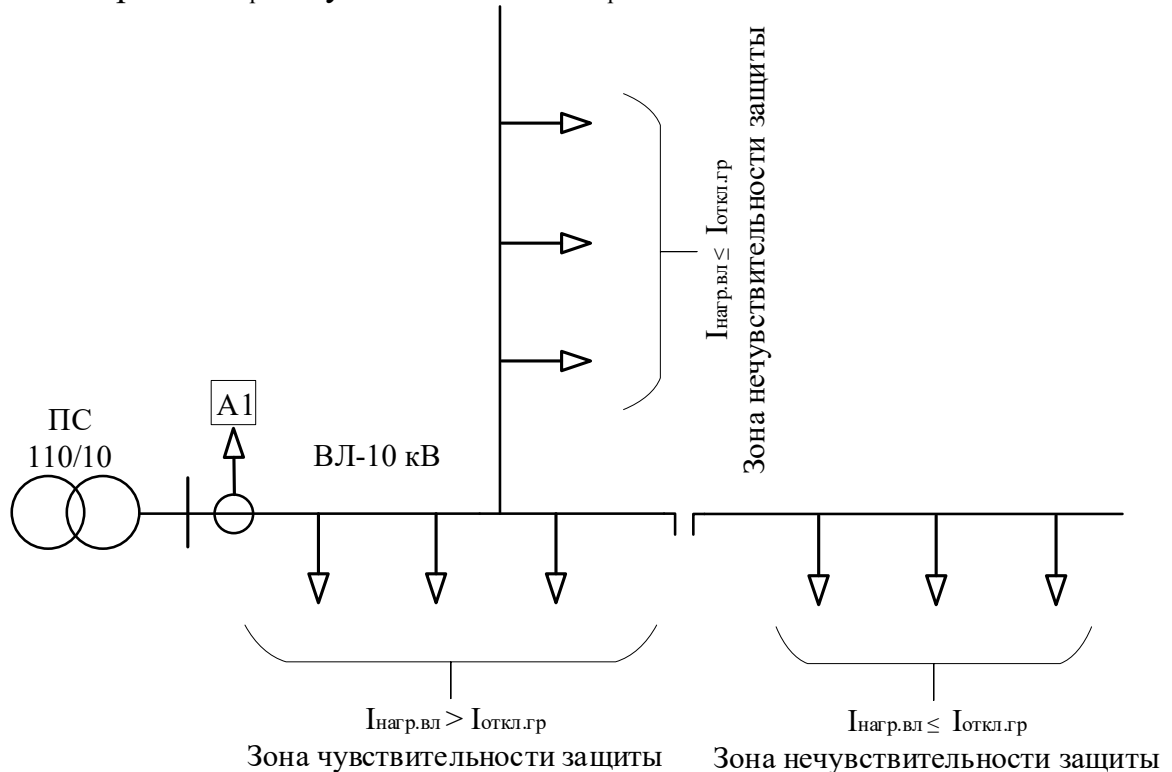


Рисунок 3.11 – Токосная защита смешанной воздушной линии

Если ток в начале отпайки $I_{\text{нагр.отп}} \leq I_{\text{откл.гранич}}$, то эта отпайка оказывается в зоне нечувствительности защиты А1, установленной в начале ВЛ1. Если ток в начале отпайки $I_{\text{нагр.отп}} \leq I_{\text{откл.гранич}}$, то независимо от места расположения отпайки по отношению к ВЛ1 (конец, середина или ее начало) отпайка оказывается в зоне нечувствительности защиты А1.

– Рассмотрим аналогичные зависимости при несимметричных нагрузках:

$P_a=0, P_b=P_c=100\%$; $P_a=P_b=0\%, P_c=100\%$; $P_a=P_b=P_c=0\%$. Согласно приведенной в п.3.3.1 методике анализа, произведем выборку данных из таблиц 3.11;3.12;3.13, приведенных в п 3.2 и внесем в таблицу 3.30.

По полученным данным строим графики $I_2 / I_1 = f(I_{\text{откл}})$ для значения $K_{зТ2}=0,5$ и разных нагрузках на фазах. Построенный график представлен на рисунке 3.12.

На этом графике наносим ток уставки защиты $(I_2 / I_1)_{\text{уст}} = 0,2$. При значениях $I_2 / I_1 \leq 0,2$ защита не будет чувствовать ОФ для всех трех рассматриваемых режимов. При $I_2 / I_1 > 0,2$ находится зона чувствительности устройства защиты для режима нагрузки $P_a=0, P_b=P_c=100\%$, для режимов $P_a=P_b=0\%, P_c=100\%$; $P_a=P_b=P_c=0\%$ зона $I_2 / I_1 > 0,2$ является зоной нечувствительности.

При пересечении рассматриваемых кривых с линией уставки $(I_2 / I_1)_{\text{уст}} = 0,2$ для режима нагрузки $P_a=0, P_b=P_c=100\%$, определяем граничные условия чувствительности защиты - $I_{\text{откл.гранич}}$.

При $K_{зТ2}=0,5; I_2 / I_1=0,1$ – это $I_{\text{откл.гранич}} = 4,98$ А или $\approx 8,44\% I_{\Sigma}$;

При $K_{зТ2}=0,5; I_2 / I_1=0,2$ – это $I_{\text{откл.гранич}} = 6,50$ А или $\approx 10,53\% I_{\Sigma}$;

При $K_{зТ2}=0,5; I_2 / I_1=0,3$ – это $I_{\text{откл.гранич}} = 13,91$ А или $\approx 23,58\% I_{\Sigma}$;

Таблица 3.30 – Определение исходных данных для построения кривых для ДТ2

КЗТ1	И _{откл}	И _{откл} / I _{н.}	P _a =0, P _b =P _c =100%	P _a = P _b =0%, P _c =100%	P _a =P _b =P _c =0%
	КЗТ2=0,5		I ₂ / I ₁	I ₂ / I ₁	I ₂ / I ₁
0,0	0,751	0,013	-	-	0,018
0,1	4,259	0,072	0,093	0,048	-
0,2	8,296	0,141	0,166	0,06	-
0,3	12,310	0,209	0,228	0,064	-
0,4	16,280	0,276	0,281	0,066	-
0,5	20,200	0,342	0,326	0,067	-
0,6	24,080	0,408	0,366	0,067	-
0,7	27,910	0,473	0,401	0,068	-
0,8	31,690	0,537	0,432	0,068	-
0,9	35,430	0,601	0,459	0,068	-
1,0	39,110	0,663	0,484	0,069	-

Можно построить эти кривые в зависимости от относительного тока (I_2/I_1)= $f(I_{откл}/ I_{н.})$. Построим три кривых по данным из таблицы 3.30. Полученные зависимости представлены на рисунке 3.13.

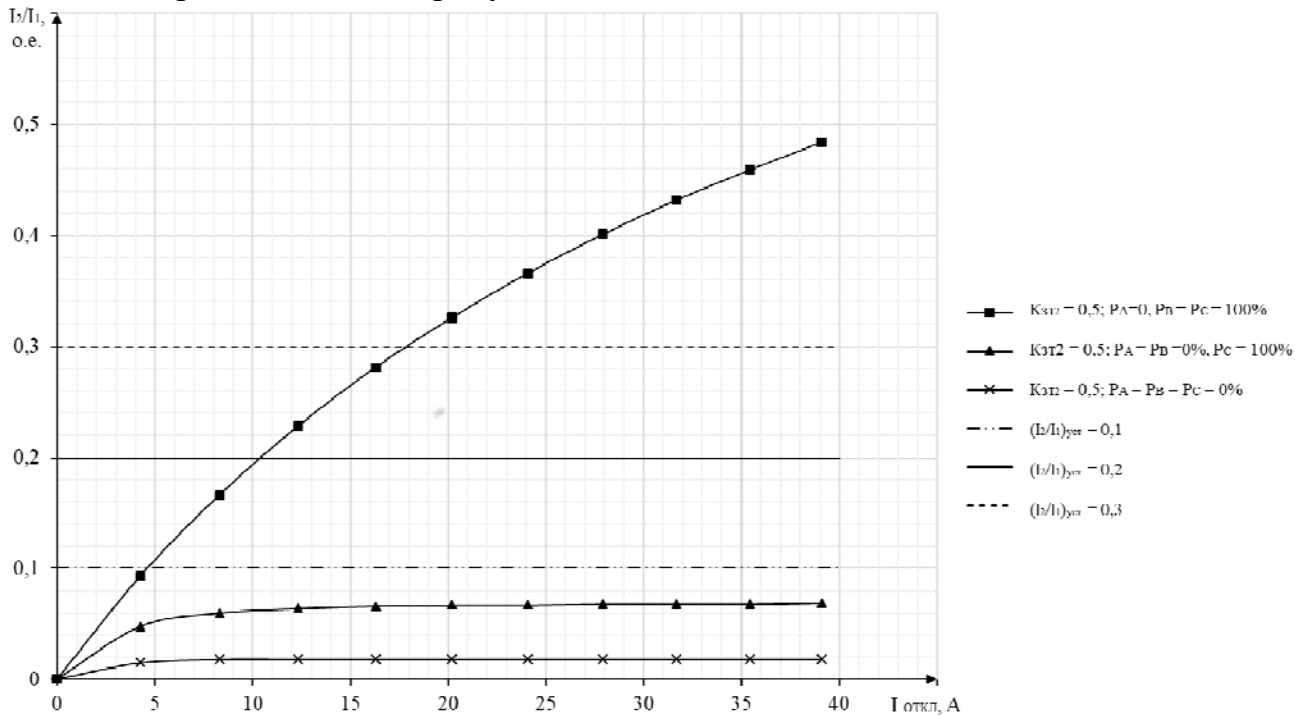


Рисунок 3.12 – Отношение I_2/I_1 в зависимости от тока отключения линии $I_{откл}$

Проанализировав полученные зависимости на рисунках 3.12 и 3.13 видим, что при несимметричной нагрузке на стороне потребителя 380 В, в первом случае, когда $P_a=0$, $P_b=P_c=100\%$; зависимость повторяет симметричный режим и с изменением величины уставки $(I_2/I_1)_{уст}$, меняется зона нечувствительности устройства защиты. С увеличением уставки – зона нечувствительности возрастает. В двух других случаях, когда $P_a= P_b=0\%$, $P_c=100\%$; $P_a=P_b=P_c=0\%$, полученные зависимости находятся в зоне нечувствительности устройства защиты.

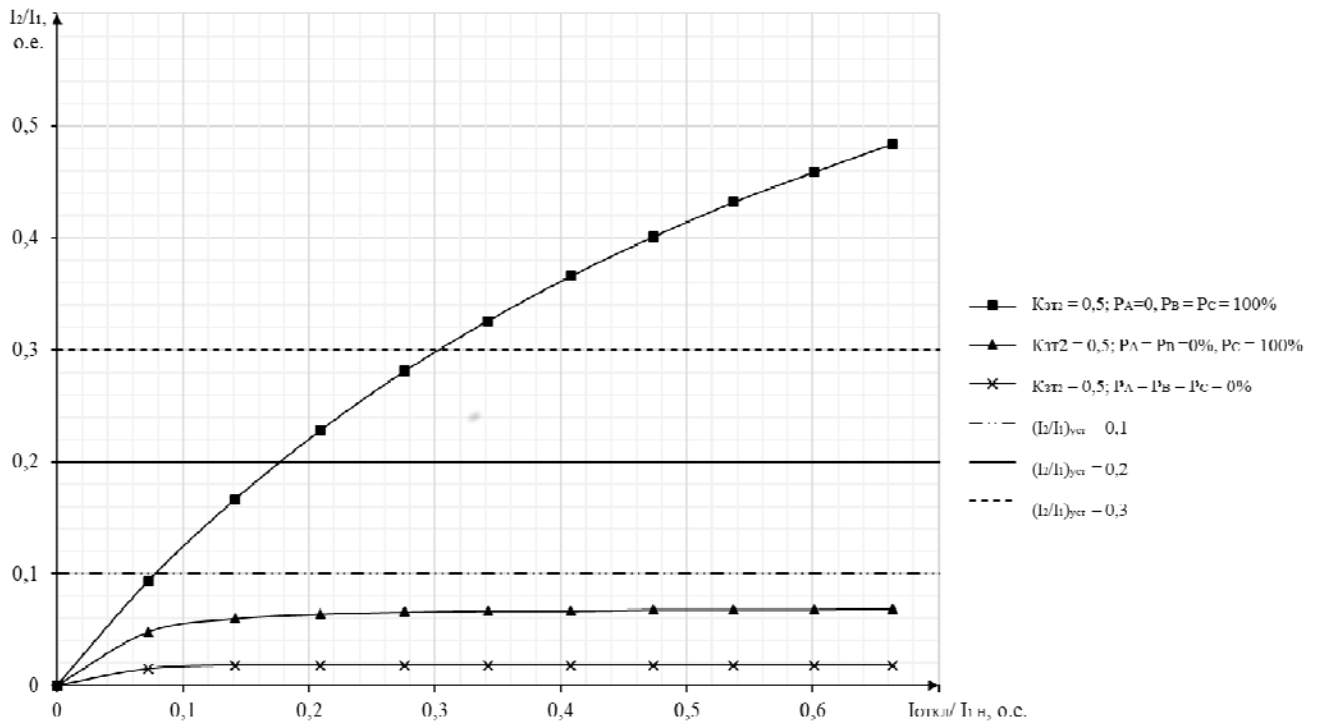


Рисунок 3.13 – Отношение I_2/I_1 в зависимости от отношения токов $I_{откл}/I_{1.н.}$.

3.3.2 Анализ и построение характеристик при выбранном информационном параметре I_2

По аналогии рассмотрим работу защиты А1, если в качестве информационного параметра использовать только сам ток обратной последовательности I_2 . – Рассматриваем обрыв провода в линии Л2 $K_{зТ2}=0,5=const$; Загрузка трансформатора Т1 меняется $K_{зТ1}=0,1-1$;

Рассматриваем симметричную нагрузку потребителей 380 В, где $P_A=P_B=P_C=100\%$;

Определяем симметричный ток отключения линии $I_{откл}$ в зависимости от коэффициента загрузки первого трансформатора Т1 - $K_{зТ1}$. Результаты выборки данных исследований сведем в таблицу 3.31. Выборку данных проводим из таблиц 3.2;3.10;3.18;3.20 и 3.21.

Таблица 3.31 – Определение исходных данных для построения кривых

$K_{зТ1}$	$I_{откл}$			$I_{откл}/I_{1.н.}, \text{ о.е.}$			$I_2, \text{ А}$		
	$K_{зТ2}=0,5$	$K_{зТ2}=0,7$	$K_{зТ2}=1$	$K_{зТ2}=0,5$	$K_{зТ2}=0,7$	$K_{зТ2}=1$	$K_{зТ2}=0,5$	$K_{зТ2}=0,7$	$K_{зТ2}=1$
0,1	4,259	4,232	4,192	0,072	0,064	0,054	2,10	2,07	2,03
0,2	8,296	8,244	8,165	0,141	0,124	0,106	4,08	4,03	3,96
0,3	12,310	12,230	12,110	0,209	0,184	0,157	6,06	5,98	5,87
0,4	16,280	16,170	16,020	0,276	0,244	0,208	8,01	7,91	7,76
0,5	20,200	20,070	19,880	0,342	0,303	0,258	9,94	9,82	9,63
0,6	24,080	23,930	23,700	0,408	0,358	0,308	11,85	11,70	11,48
0,7	27,910	27,730	27,470	0,473	0,416	0,357	13,73	13,56	13,31
0,8	31,690	31,490	31,200	0,537	0,475	0,405	15,60	15,40	15,11
0,9	35,430	35,200	34,870	0,601	0,531	0,453	17,43	17,22	16,89
1,0	39,110	38,870	38,500	0,663	0,586	0,500	19,25	19,01	18,65

Суммарный ток в начале линии при $K_{зТ1}=1$ и $K_{зТ2}=0,5$ представлен в таблице 3.32.

Таблица 3.32 – Суммарный ток в начале линии

$I_{НАГР}$	$K_{зТ1}$	$K_{зТ2}$
58,99	1,0	0,5
66,33	1,0	0,7
77,00	1,0	1,0

По отношению к этим токам будем рассматривать отношение $I_{откл}/I_{1.н.}$, сводим в 5 колонку таблицы 3.31.

Аналогично делаем выборку тока $I_{откл}$ при $K_{зТ2}=0,7$ и $K_{зТ1}=1$, $K_{зТ2}=1$ и $K_{зТ1}=1$. Абсолютные значения токов те же (колонка 2,3,4, таблица 3.31), а относительные значения $I_{откл}/I_{1.н.}$ вносим в 5, 6 и 7 колонки таблицы 3.31.

При ОФА $K_{зТ2}=0,5$ и изменении $K_{зТ1}=0,1-1$ из таблицы делаем выборку тока обратной последовательности I_2 и вносим в восьмую колонку таблицы 3.31.

Аналогично при $K_{зТ2}=0,7$, $K_{зТ2} = 1,0$ и изменении $K_{зТ1}=0,1-1$ делаем выборку тока обратной последовательности I_2 и вносим в девятую и десятую колонки таблицы 3.31.

По полученным данным строим графики $I_2 = f(I_{откл})$ для разных значений $K_{зТ2}=0,5; 0,7$ и $1,0$. Построенный график представлен на рисунке 3.14.

На этом графике наносим ток уставки защиты $I_2^*(0,1) = 5,89$ (А); $I_2^*(0,2) = 11,78$ (А); $I_2^*(0,3) = 17,69$ (А).

При значениях $I_2^*(0,2) \leq 0,2$ защита не будет чувствовать ОФ. При $I_2^*(0,2) > 0,2$ находится зона чувствительности устройства защиты.

При пересечении рассматриваемых кривых с линией уставки $I_2^*(0,2)_{уст} = 0,2$ определяем граничные условия чувствительности защиты - $I_{откл.гранич.}$.

При $K_{зТ2}=0,5$ – это $I_{откл.гранич.} = 23,58$ А или $\approx 39,9\% I_{\Sigma}$;

При $K_{зТ2}=0,7$ – это $I_{откл.гранич.} = 23,59$ А или $\approx 40,0\% I_{\Sigma}$;

При $K_{зТ2}=1,0$ – это $I_{откл.гранич.} = 23,58$ А или $\approx 39,9\% I_{\Sigma}$.

Можно построить эти кривые в зависимости от относительного тока (I_2)= $f(I_{откл}/I_{1.н.})$. Построим три кривых по данным из таблицы 3.31. Полученные зависимости представлены на рисунке 3.15.

Можно построить эти кривые в зависимости от относительного тока $I_2=f(I_{откл}/I_{1.н.})$.

По этим кривым также можно определить $I_{откл.гранич.}$. Значения токов представлены в таблице 3.33.

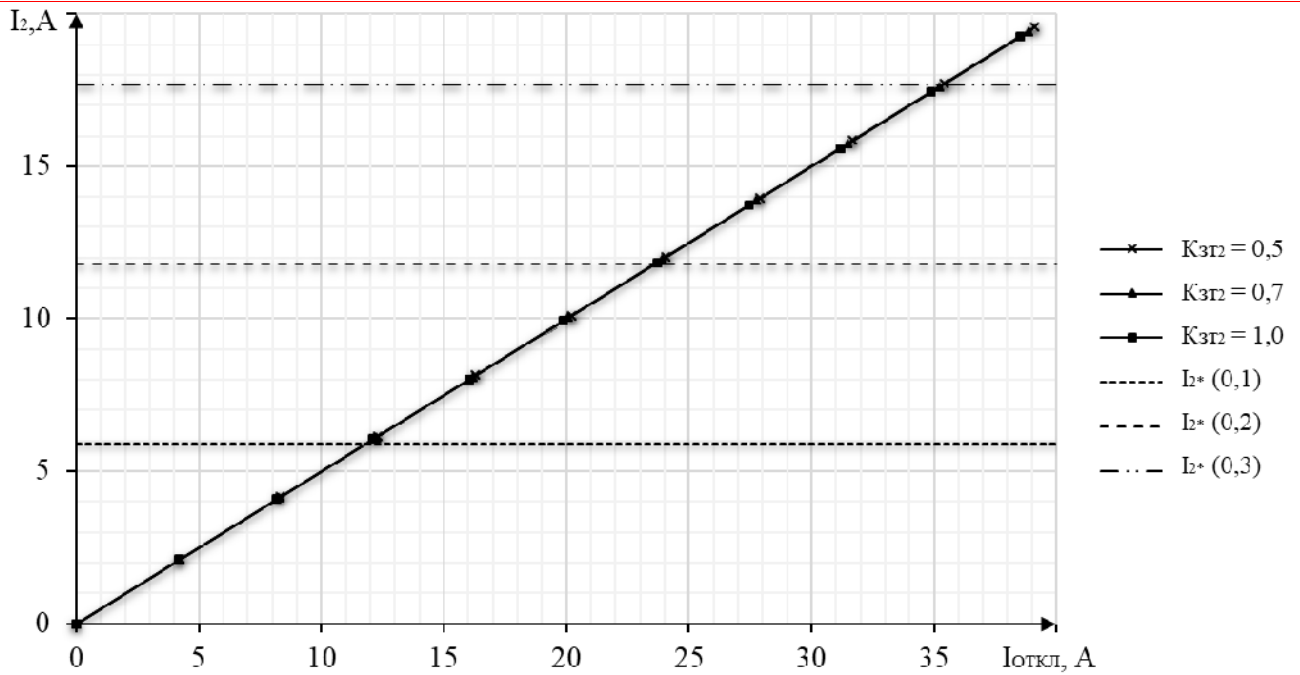


Рисунок 3.14 - Отношение тока I_2 в зависимости от тока отключения линии $I_{откл}$

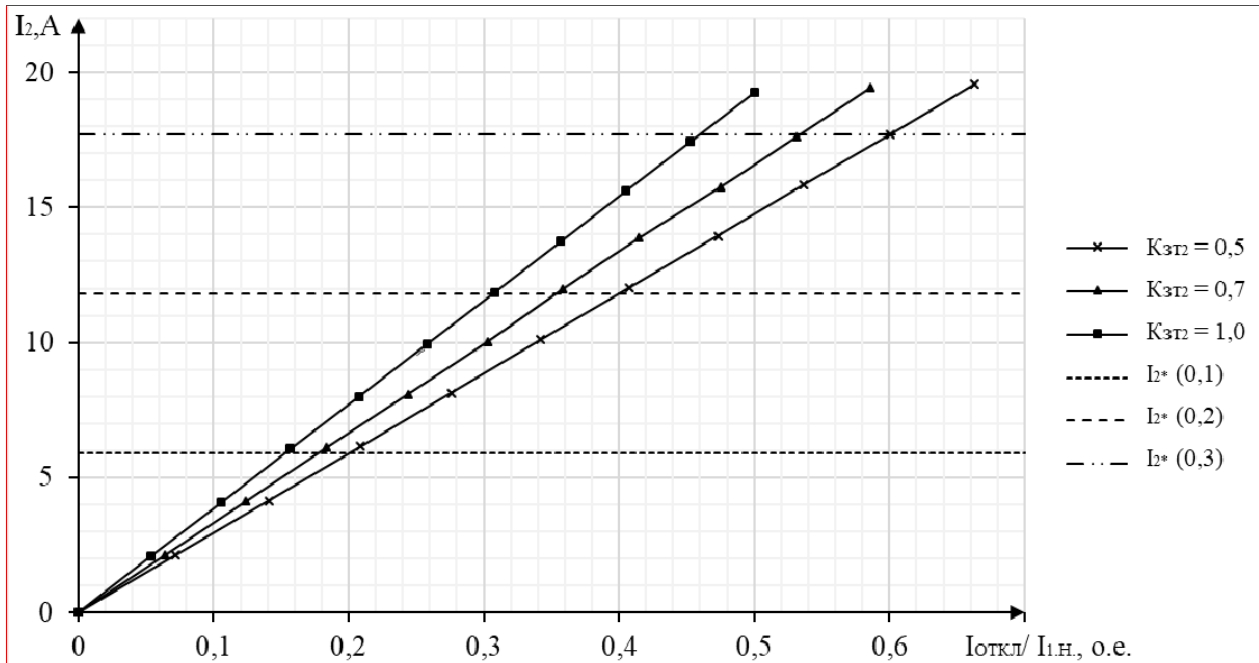


Рисунок 3.15 – Отношение тока I_2 в зависимости от $I_{откл}/I_{1.н.}$

Рассмотрим, как изменяются значения граничного тока отключения $I_{откл.гранич}$ в зависимости от передаваемой мощности в начале воздушной линии. Для этого сделаем следующую выборку, которую сведем в таблицу 3.33

По полученным данным строим зависимость $I_{откл.гранич} = f(S_{1.НАГР})$ – рисунок 3.16

Полученная зависимость показывает, что чем больше нагрузка в начале линии, тем защита, установленная в начале ВЛ1 (А1) имеет большую зону нечувствительности при обрыве провода на конечных участках ВЛ2 и ВЛ3.

Таблица 3.33 – Зависимость граничного тока от передаваемой мощности

КЗТ ₂	КЗТ ₁	I _{откл.гр}	I _{1.нагр}	S _{1.нагр}
0,5	1	23,58	58,99	1,073
0,7	1	23,59	66,33	1,206
1,0	1	23,58	77,00	1,400

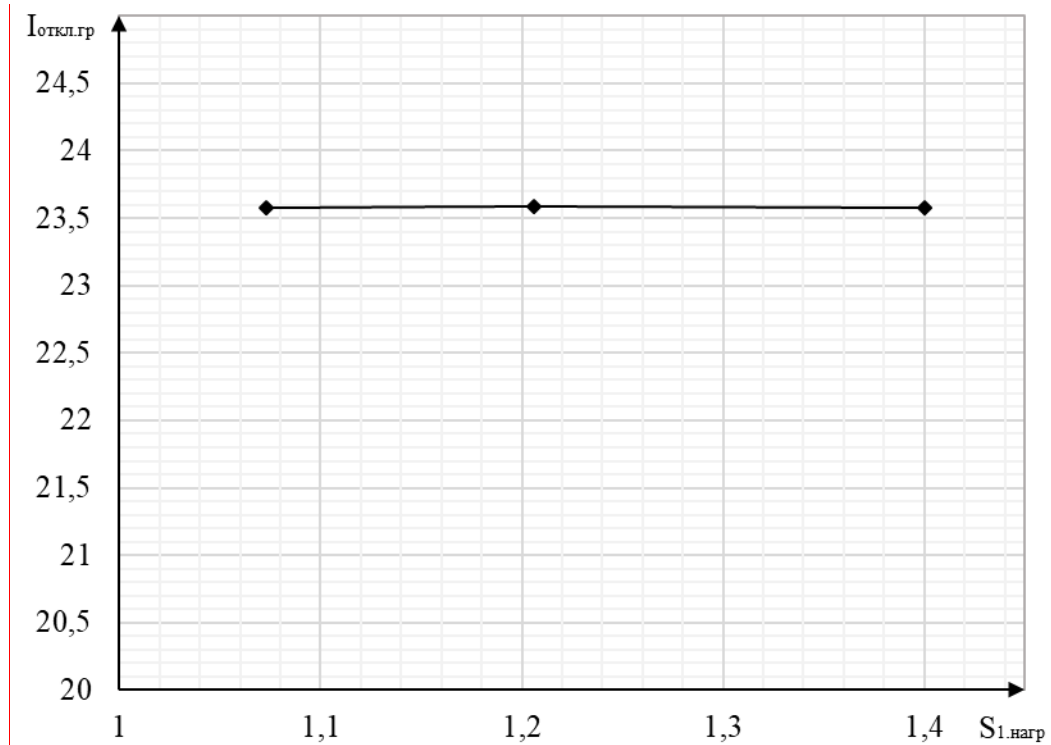


Рисунок 3.16 - Зависимость граничного тока от передаваемой мощности

Сделаем выводы о том как изменяется $I_{откл.гранич}$ при изменении величины уставки $(I_2^*)_{уст}$ равной 0,1 и 0,3. Проведем анализ, используя рисунки 3.14 и 3.15, а именно нанесением линий уставок и определением новых значений токов $I_{откл.гранич}$. Полученные значения токов внесем в таблицу 3.34.

Таблица 3.34 - $I_{откл.гр}$ при уставках 0,1; 0,2 и 0,3

КЗТ ₂	КЗТ ₁	$(I_2^*)_{уст}$	I _{откл.гр} , А
0,5	1	0,1	11,98
0,7			11,98
1,0			11,98
0,5	1	0,2	23,58
0,7			23,58
1,0			23,58
0,5	1	0,3	35,2
0,7			35,2
1,0			35,2

Получив новые значения $I_{откл.гранич}$, мы видим как меняются зоны нечувствительности. При $(I_2^*)_{уст} = 0,1$ - зона уменьшается, а при $(I_2^*)_{уст} = 0,3$ - зона увеличивается.

По полученным данным строим зависимость $I_{откл.гранич} = f(I_2.уст)$ – рисунок 3.17

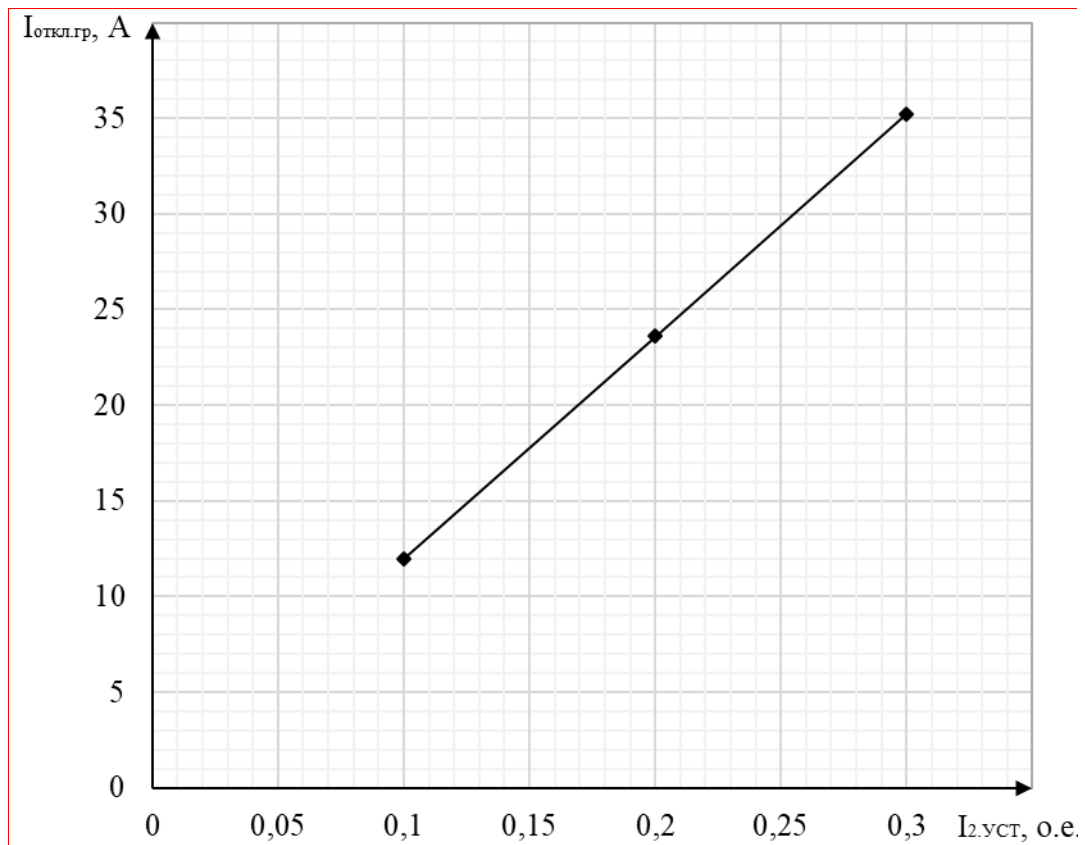


Рисунок 3.17 - Зависимость граничного тока от величины уставки

– Рассмотрим аналогичные зависимости при несимметричных нагрузках:
 $P_a=0, P_b=P_c=100\%$; $P_a=P_b=0\%, P_c=100\%$; $P_a=P_b=P_c=0\%$

Согласно приведенной в п.3.3.1 методике анализа, произведем выборку данных из таблиц 3.2-3.25 приведенных в п 3.2 и внесем в таблицу 3.35.

Таблица 3.35 – Определение исходных данных для построения кривых для ДТ1

КзТ1	$I_{откл}$	$I_{откл}/ I_{л.н.}$	$P_a=0, P_b=P_c=100\%$	$P_a=P_b=0\%, P_c=100\%$	$P_a=P_b=P_c=0\%$
	КзТ2=0,5		I_2	I_2	I_2
0,0	0,751	0,013	-	-	0,369
0,1	4,259	0,072	2,10	1,01	0,018
0,2	8,296	0,141	4,08	1,26	0,018
0,3	12,310	0,209	6,06	1,34	0,018
0,4	16,280	0,276	8,01	1,38	0,018
0,5	20,200	0,342	9,94	1,40	0,018
0,6	24,080	0,408	11,85	1,41	0,018
0,7	27,910	0,473	13,73	1,42	0,018
0,8	31,690	0,537	15,60	1,43	0,018
0,9	35,430	0,601	17,43	1,43	0,018
1,0	39,110	0,663	19,25	1,43	0,018

По полученным данным строим графики $I_2 = f(I_{откл})$ для значения $КзТ2=0,5$ и разных нагрузках на фазах. Построенный график представлен на рисунке 3.18.

На этом графике наносим ток уставки защиты $I_2^*(0,1) = 5,89 \text{ (А)}$; $I_2^*(0,2) = 11,78 \text{ (А)}$; $I_2^*(0,3) = 17,69 \text{ (А)}$.

При значениях $I_{2*}(0,2) \leq 0,2$ защита не будет чувствовать ОФ. При $I_{2*}(0,2) > 0,2$ находится зона чувствительности устройства защиты для режима нагрузки $P_a=0$, $P_b=P_c=100\%$; для режимов $P_a=P_b=0\%$, $P_c=100\%$; $P_a=P_b=P_c=0\%$ зона $I_{2*}(0,2) > 0,2$ является зоной нечувствительности.

При пересечении рассматриваемых кривых с линией уставки $I_{2*}(0,2) = 0,2$ для режима нагрузки $P_a=0$, $P_b=P_c=100\%$, определяем граничные условия чувствительности защиты - $I_{откл.гранич.}$.

При $K_{зт2}=0,5$; $I_2/I_1=0,1$ – это $I_{откл.гранич.} = 11,82$ А или $\approx 20,00\%$ I_{Σ} ;

При $K_{зт2}=0,5$; $I_2/I_1=0,2$ – это $I_{откл.гранич.} = 23,52$ А или $\approx 39,88\%$ I_{Σ} ;

При $K_{зт2}=0,5$; $I_2/I_1=0,3$ – это $I_{откл.гранич.} = 36,58$ А или $\approx 62,03\%$ I_{Σ} ;

Можно построить эти кривые в зависимости от относительного тока (I_2)= $f(I_{откл./I_{н.}}$). Построим три кривых по данным из таблицы 3.35. Полученные зависимости представлены на рисунке 3.19.

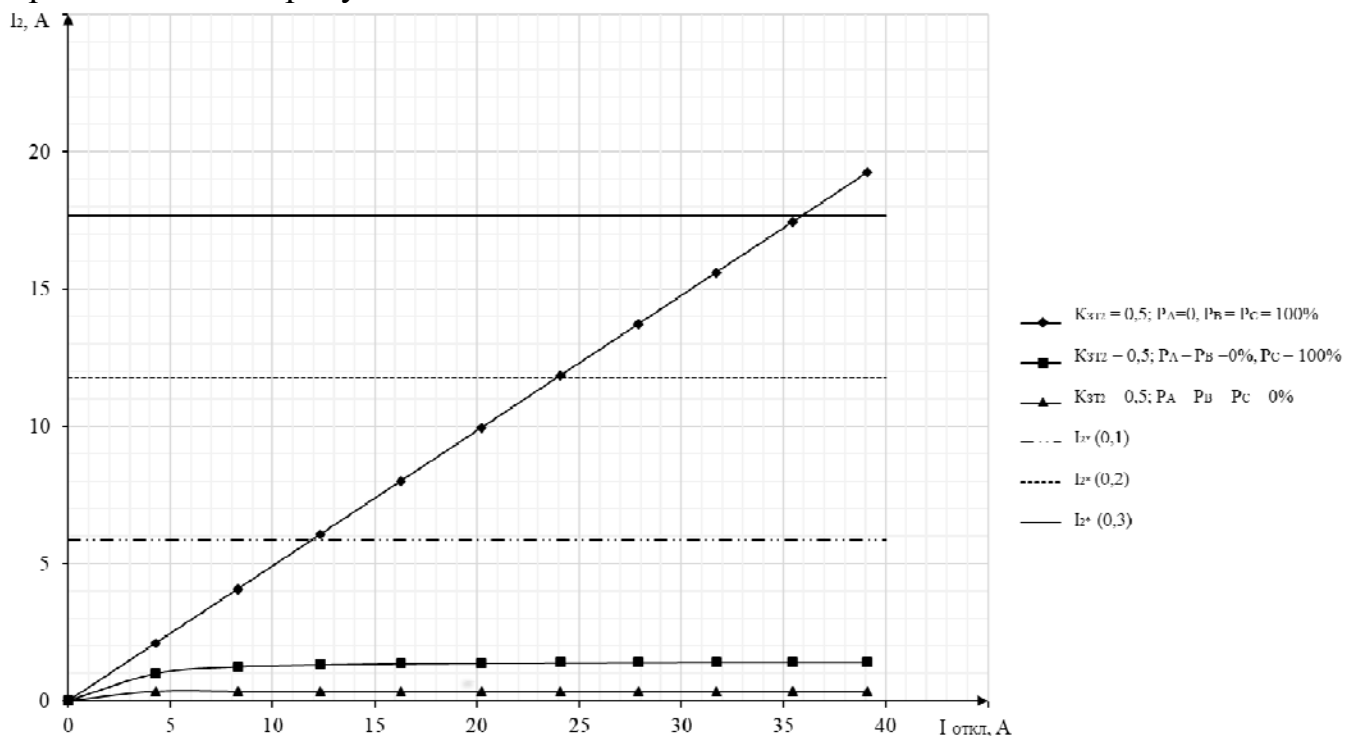


Рисунок 3.18 – Отношение тока I_2 в зависимости от тока отключения линии $I_{откл.}$

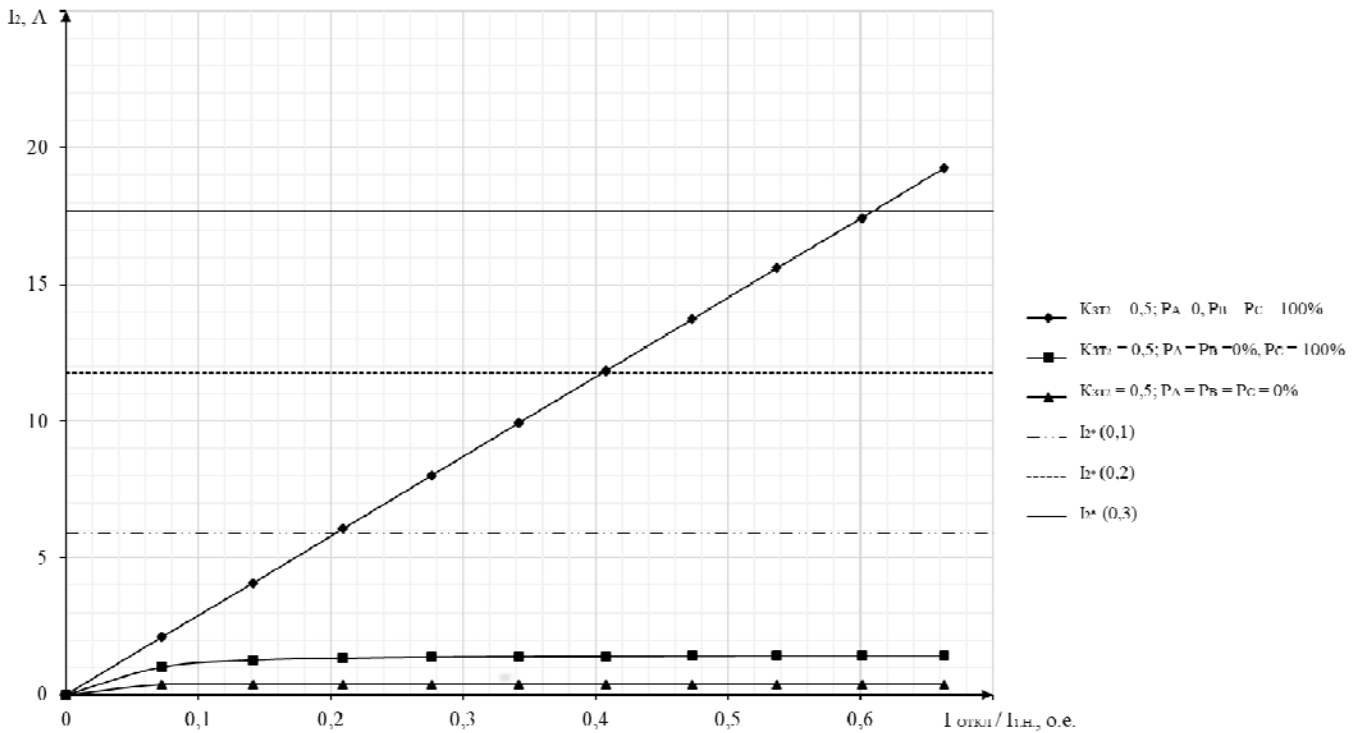
Рисунок 3.19 – Отношение тока I_2 в зависимости от $I_{откл}/I_{н.н.}$.

Таблица 3.36 – Зависимость граничного тока от передаваемой мощности

$K_{ЗТ2}$	$K_{ЗТ1}$	P_a, P_b, P_c	$(I_2/I_1)_{уст}$	$I_{откл.гр}$	$I_{1.нагр}$	$S_{1.нагр}$
0,5	1	$P_a=0,$ $P_b=P_c=100\%$	0,1	11,82	58,99	1,073
	1	$P_a=P_b=0\%,$ $P_c=100\%$		-	-	-
	0	$P_a=P_b=P_c=0\%$		-	-	-
0,5	1	$P_a=0,$ $P_b=P_c=100\%$	0,2	23,52	58,99	1,073
	1	$P_a=P_b=0\%,$ $P_c=100\%$		-	-	-
	0	$P_a=P_b=P_c=0\%$		-	-	-
0,5	1	$P_a=0,$ $P_b=P_c=100\%$	0,3	36,58	58,99	1,073
	1	$P_a=P_b=0\%,$ $P_c=100\%$		-	-	-
	0	$P_a=P_b=P_c=0\%$		-	-	-

Для радиальной линии (рисунок 3.20, а) с сосредоточенной нагрузкой в конце ВЛ значение тока обратной последовательности $I_2^* = 0,5$ о.е. независимо от точки обрыва фазного провода (рисунок 3.20, б).

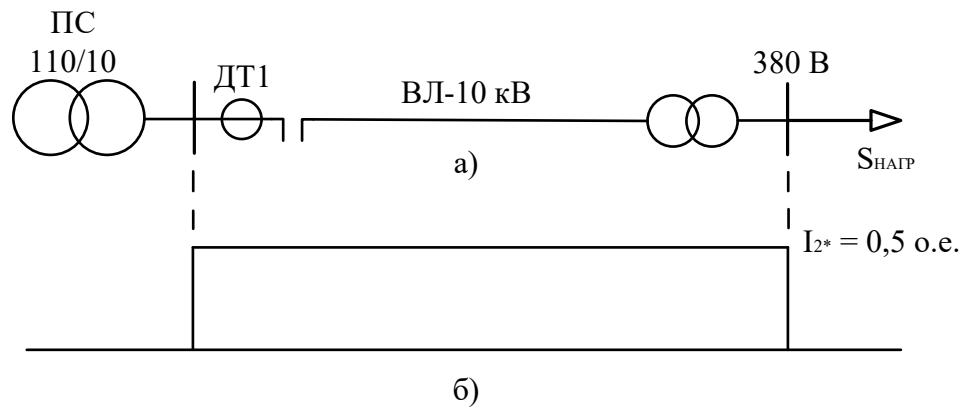


Рисунок 3.20 – Токовая защита радиальной ВЛ, построение на использовании тока обратной последовательности I_2

Для магистральной линии (рисунок 3.21, а) с равномерно распределенной нагрузкой ток обратной последовательности изменяется от $I_2^* = 0,5$ о.е. до нуля (рисунок 3.21, б).

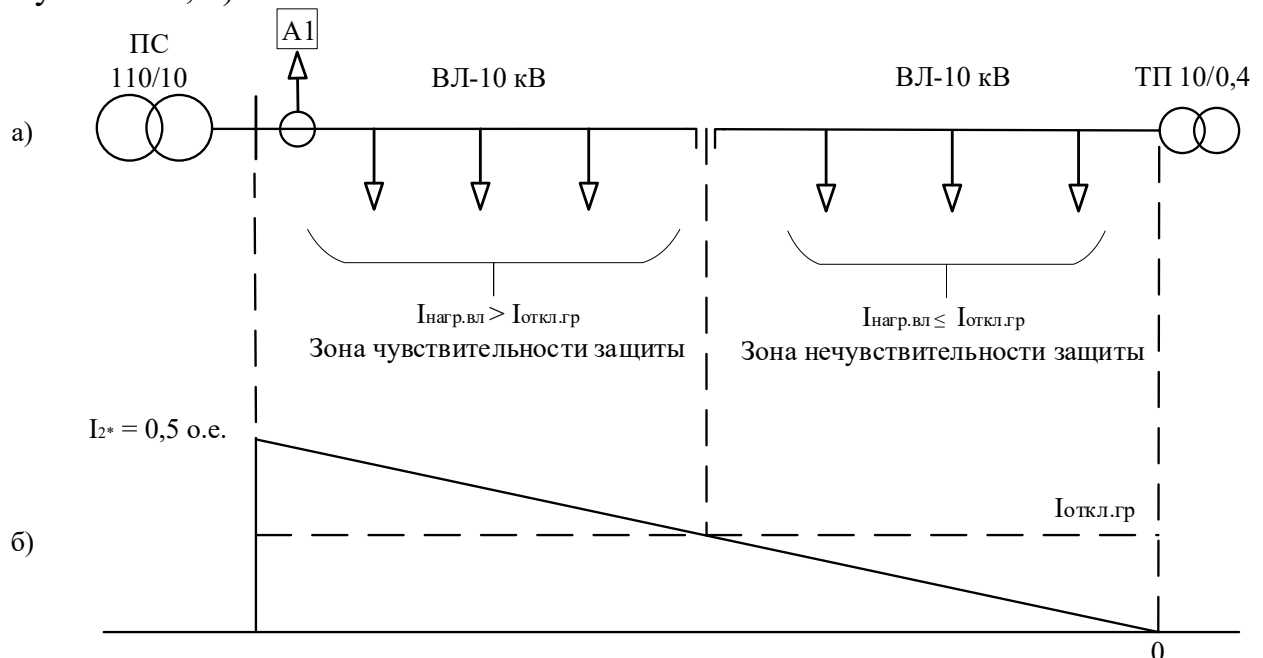


Рисунок 3.21 – Токовая защита магистральной воздушной линии

В заключение построим эпюры распределения информационных параметров по длине ВЛ и проведем сопоставление чувствительности двух видов рассматриваемых защит.

Сравнивая эпюры распределения информационных параметров I_2/I_1 – рисунок 3.22 и I_2 – рисунок 3.23, мы можем сделать вывод, что чувствительность защиты, в которой используется отношение I_2/I_1 оказывается существенно выше чувствительности защиты, в которой в качестве информационного параметра используется ток I_2 .

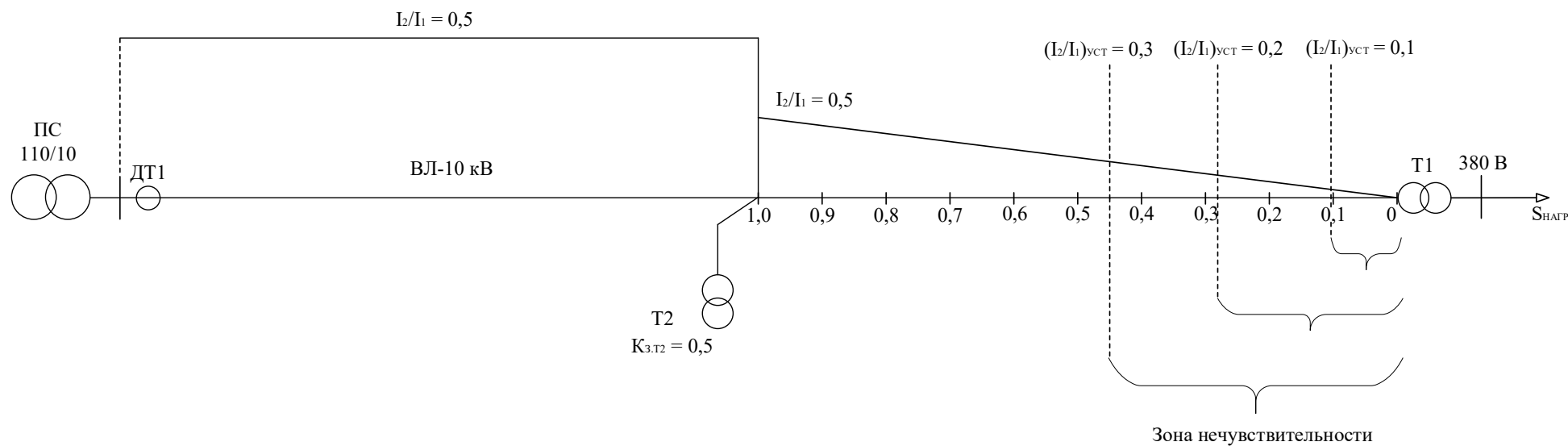


Рисунок 3.22 – Эпюра распределения информационного параметра I_2/I_1 в зависимости от места обрыва фазного провода ВЛ

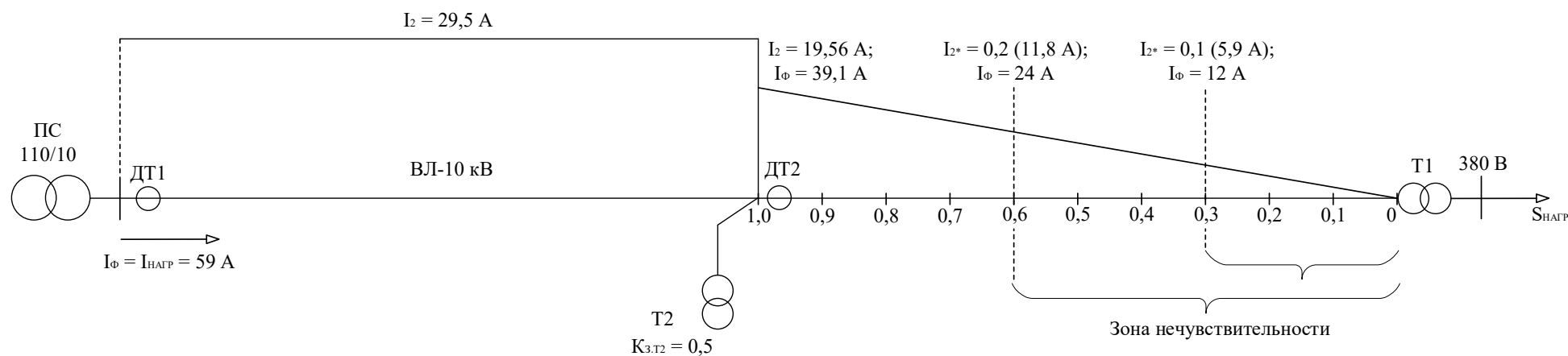


Рисунок 3.23 – Эпюра распределения информационного параметра I_2 в зависимости от места обрыва фазного провода ВЛ

3.4 Вывод по разделу 3

Проведён анализ двух вариантов информационных параметров, используемых для построения защиты, установленной в начале ВЛ, при обрыве фазного провода воздушных линий напряжением 10 кВ – отношения тока обратной последовательности к току прямой последовательности I_2/I_1 и тока обратной последовательности I_2). Исследования проведены при симметричной нагрузке электроприёмников напряжением 380 В.

1 При использовании в качестве информационного параметра отношения тока обратной последовательности к току прямой последовательности I_2/I_1 имеем следующие результаты:

1.1 При защите радиальной ВЛ с сосредоточенной нагрузкой в её конце (при отсутствии отпаек) отношение I_2/I_1 при возникновении обрыва провода в любой точке ВЛ становится равным единице $I_2/I_1 = 1$, что обеспечивает чёткое срабатывание устройства защиты.

1.2 При защите магистральной линии с равномерно распределённой нагрузкой по длине ВЛ (или дискретно распределённой) отношение I_2/I_1 при возникновении обрыва провода по длине ВЛ линейно изменяется от единицы до нуля.

1.3 При защите отпаечной линии если её ток нагрузки оказывается меньше граничного, зависящего от значения уставки защиты, $I_{\text{нагр.отп}} \leq I_{\text{гран}}$, то эта линия оказывается в зоне нечувствительности защиты, т. е. защита не будет чувствовать обрыв фазного провода на этой отпаечной линии. При этом, защита, установленная в начале ВЛ на ПС, не будет чувствовать обрыв провода независимо от места подключения отпайки к ВЛ.

1.4 Чувствительность защиты, построенной на использовании информационного параметра I_2/I_1 , имеет меньшую зависимость от изменения величины тока нагрузки ВЛ в её начале.

2 При использовании в качестве информационного параметра тока обратной последовательности I_2 имеем следующие результаты:

2.1 При защите радиальной ВЛ с сосредоточенной нагрузкой в её конце (при отсутствии отпаек) ток обратной последовательности I_2 при возникновении обрыва провода в любой точке ВЛ становится равным половине фазного тока, протекающего по ВЛ до обрыва провода $I_2 = 0,5 \cdot I_{\text{ф}}$ или в относительных единицах – $I_2^* = 0,5$ о. е., что обеспечивает чёткое срабатывание устройства защиты.

2.2 При защите магистральной линии с равномерно распределённой нагрузкой по длине ВЛ (или дискретно распределённой) ток обратной последовательности I_2 при возникновении обрыва провода по длине ВЛ линейно изменяется от 0,5 о. е. до нуля.

2.3 При защите отпаечной линии если её ток нагрузки $I_{\text{нагр.отп}}$ оказывается меньше граничного $I_{\text{гран}}$, зависящего от значения уставки защиты $I_{2,\text{уст}}$, то эта линия оказывается в зоне нечувствительности защиты, т. е. защита не будет чувствовать обрыв фазного провода на этой отпаечной линии. При этом, защита, установленная в начале ВЛ на ПС, не будет чувствовать обрыв провода независимо от места подключения отпайки к ВЛ.

2.4 Чувствительность защиты, построенной на использовании информационного параметра I_2 , имеет большую зависимость от изменения величины тока нагрузки ВЛ в её начале.

3 Чем выше нагрузка в начале ВЛ, тем больше зоны нечувствительности на конечных или отпаечных участках ВЛ.

4 Чем выше значения уставок устройств защиты, тем больше их зоны нечувствительности. Снижение значений уставок «снизу» ограничены изменениями информационных параметров при различных нерассмотренных режимах работы электрической сети напряжением 10/0,38 кВ, в частности, несимметрией фазных нагрузок потребителей напряжением 380 В.

5 Сравнение эпюр распределения информационных параметров I_2/I_1 и I_2 показывает, что чувствительность защиты, использующей отношение токов I_2/I_1 , оказывается существенно выше чувствительности защиты, использующей ток I_2 .

4 ОЦЕНКА УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ВЛ-10 кВ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА

4.1 Оценка условий электробезопасности

На данный момент влияние электрического тока на организм человека изучено на серьезном уровне, созданы многочисленные лабораторные комплексы по изучению данной проблемы, смоделированы распространенные виды повреждений сетей, чтобы в процессе обучения и уже дальнейшей эксплуатации электрических сетей обезопасить и оградить людей от получения электротравм.

По видам воздействия электрического тока на организм человека различают следующие виды:

- термическое воздействие;
- электролитическое воздействие;
- механическое (динамическое) воздействие.

Также электрический ток воздействует на организм человека с биологической и химической точки зрения, так как воздействие электрического тока является специфическим процессом, который присущ только живой ткани.

В сетях с изолированной нейтралью, определяющее воздействие на результат однофазного прикосновения оказывает уровень сопротивления изоляции токоведущих частей относительно земли.

В настоящее время на территории РФ и за границей производятся такие устройства контроля уровня изоляции, которые, в свою очередь, имеют различия в принципе работы устройств, также имеют различия в конструктивной части, области применения и надежности работы.

В состав основных элементов устройств контроля изоляции входят:

- разделительный трансформатор вместе с устройством контроля перегрузки, температуры и сопротивления уровня изоляции разделительно трансформатора;
- система контроля изоляции электроустановки ответственного потребителя.
- система автоматического включения резерва (АВР);

Так как данное устройство является основным элементом в системе контроля изоляции, оно имеет достаточно высокие технические требования по сопротивлению изоляции между первичной и вторичной обмотками, по исполнению, по значению пускового тока, по нагреву, и т. д.

На основании ПУЭ [63] действующему на территории РФ, использование устройств контроля изоляции регламентируется п.1.6.12: «В сетях переменного тока выше 1 кВ с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, в сетях переменного тока до 1 кВ с изолированной нейтралью и в сетях постоянного тока с изолированными полюсами или с изолированной средней точкой, как правило, должен выполняться автоматический контроль изоляции, действующий на сигнал при снижении сопротивления изоляции одной из фаз (или полюса) ниже заданного значения, с последующим контролем асимметрии напряжения при помощи показывающего прибора (с переключением)» [63].

В ПУЭ [63] в п. 1.7.166. предписывается обязательное применение контроля изоляции в передвижных электроустановках:

«Автономные передвижные источники питания с изолированной нейтралью должны иметь устройство непрерывного контроля сопротивления изоляции относительно корпуса (земли) со световым и звуковым сигналами. Должна быть обеспечена возможность проверки исправности устройства контроля изоляции и его отключения» [63].

Основными условиями при выборе уставки устройства контроля изоляции являются условия электробезопасности или условия по устойчивому среднему уровню сопротивления изоляции сети относительно земли.

Выявление поврежденного участка (фидера) электрической сети с изолированной нейтралью, где непосредственно произошла авария во время ее эксплуатации является одним из самых трудных и сложных процессов.

Согласно утвержденной классификации МЭК различают следующий класс приборов контроля дифференциального тока - RCM (residual current monitor).

Данный тип устройств гарантирует нам контроль изоляции электрической сети по принципу селективности. Существует различное множество конструктивных исполнений данных приборов, так, они бывают стационарными вместе с центральным блоком управления и опросом ДТ (токовых датчиков), которые устанавливаются на присоединениях, и также они могут быть переносными, в виде токоискательных клещей, что позволяет эксплуатирующему персоналу (оператору) увидеть все пути (трассы) появившейся утечки тока на землю.

Устройство, которое обеспечивает вывод из работы только поврежденного участка сети или выключателя называется селективным (избирательным). Последовательность работы (алгоритм) селективного отключения фидера (присоединения) необходимо осуществлять с учетом основных параметров построения электрических сетей (конфигурация, разветвленность, категория электроснабжения и т.д.).

В связи с развитием цифровизации всех сфер, просматривается тенденция по использованию устройств контроля изоляции совместно с электрическими сетями типа IT в комплексе, что является мерой получения максимальной безопасности и надежности электроснабжения.

4.2 Оценка технико-экономической эффективности

Для оценки экономической эффективности капитальных затрат на создание системы защиты ВЛ-10 кВ от обрывов фазных проводов нам необходимо уточнить цены на используемое оборудование. Расчет капитальных затрат по созданию системы защиты ВЛ-10 кВ от обрывов фазных проводов выполнен в форме сметы, цены приняты за 2018 год (таблица 4.1) [18]. Были приняты исходные данные для проведения расчета: для трех воздушных линий длиной Л1=10 км, Л2 и Л3 по 3 км на которые приходится 10 потребителей (по пять потребителей на Л2 и Л3), расчетная нагрузка которых равна $P_p=100$ кВт.

Таблица 4.1 – Смета капитальных затрат на организацию системы защиты ВЛ-10 кВ

Блок системы	Кол-во, компл.	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость установки, руб.	Стоимость наладки, руб.	Капитальные затраты, руб.
Rec_15 Стандарт (вакуумный выключатель – ВВР–10 «Росвакуум», микропроцессорная защита – БЗП-01 монтажный комплект для установки на опору, без обогрева, без ОПН)	3	1200000	20000	6000	1226000
Защита от однофазных замыканий на землю ОЗЗ (дополнительный трансформатор тока)	3	45000	3000	3000	51000
Телемеханика (опрос и удаленное управление реклоузером по GSM-каналу). GSM-модем TELEOFIS RX608-R2, антенна Antey 906 13,5 dB SMA (устанавливаются в ШУ реклоузера)	3	25000	3000	3000	31000
Оборудование в диспетчерскую для опроса и удаленного управления реклоузером по GSM-каналу. GSM-модем TELEOFIS RX101-R4, антенна DAM-P2 SMA	1	7700	2000	1000	10700
Климатическое исполнение УХЛ1 (обогрев шкафа управления)	3	16500	3000	3000	22500
Комплект ограничителей перенапряжений ОПН (3 шт., с траверсой)	3	19200	3000	3000	25200
Итого					1366400

При обрыве фазного провода, ущерб от недоотпуска э/энергии будет составлять:

$$\Delta Y = Y_0 \cdot \Delta W_{\text{ПЭ}}, \quad (4.1)$$

где Y_0 – удельный ущерб от недоотпуска 1 кВт·ч э/энергии, руб/кВт·ч,
 $Y_0 = 132,12$ руб/кВт·ч;

$\Delta W_{\text{ПЭ}}$ – количество недоотпущенной э/энергии за время перерыва электроснабжения потребителей в результате обрыва проводов, кВт·ч.

$$\Delta W_{\text{ПЭ}} = \frac{W_{\text{А.ГОД}}}{T_{\text{ГОД}}} T_{\text{ПР}}, \quad (4.2)$$

где $W_{\text{А.ГОД}}$ – потребляемая за год энергия, кВт;

$T_{\text{ГОД}}$ – количество часов в году, $T_{\text{ГОД}} = 8760$ ч;

$T_{\text{ПР}}$ – время простоя электрической цепи в результате обрыва проводов.

Количество потребленной энергии за год составит:

$$W_{\text{А.ГОД}} = P_{\text{Р}} \cdot T_{\text{ИМ}} = 600 \cdot 3500 = 2100 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год}. \quad (4.3)$$

При применении системы защиты от обрывов фазных проводов удастся снизить время выявления обрыва фазного провода линии приблизительно на 48 часов, по сравнению с тем вариантом, когда рассматривается случай без применения системы защиты. Согласно официальной статистике по аварийным отключениям по ЦЭС ОАО Филиала «МРСК Урала» доля повреждений ВЛ-10 кВ включает в себя порядка 50 повреждений в год на 100 км, стоит отметить, что 62% из них являются обрывы фазных проводов.

Отсюда следует вывод, что на линию протяженностью 0,8 км приходится 0,248 отказов в год. На основе имеющихся данных сделан следующий вывод, что при использовании системы защиты от обрывов фазных проводов ВЛ-10 кВ время выявления обрыва фазного провода сокращается примерно на 11,9 ч/год. Стоит отметить, что время, которое затрачивается на устранение обрыва фазного провода не берется в расчет, в силу того что одинаково при условиях наличия и отсутствия дополнительной функции защиты. В конечном итоге, $T_{\text{ПР}} = 11,9$ ч/год.

Подставим найденные значения в формулу (4.2), получим:

$$\Delta W_{\text{ПЭ}} = \frac{2100}{8760} \cdot 11,9 = 2,85 \text{ МВт/год}.$$

Отсюда, ущерб по формуле (4.1) составляет:

$$\Delta Y = 132,12 \cdot 2,85 \cdot 1000 = 376542 \text{ руб / год}.$$

Одним из показателей, который характеризует период во время которого окупятся дополнительные кап. вложения за счет экономии на себестоимости, или отношение кап. вложений к экономическому эффекту, получаемому благодаря этим вложениям, является окупаемость капитальных вложений.

Определяем срок окупаемости создания системы защиты ВЛ-10 кВ от обрывов фазных проводов для группы потребителей, питающейся от двух ТП.

Срок окупаемости вложений определяется по формуле:

$$T_{\text{OK}} = \frac{K}{\Delta Y}, \quad (4.4)$$

где K – единовременные капитальные вложения на внедрение новой системы защиты линий, руб.;

ΔY – экономия на платежах или предотвращенный ущерб, руб/год.

Тогда по формуле (4.5) получаем:

$$T_{\text{OK}} = \frac{1366400}{376542} = 3,62 \text{ лет}$$

В электроэнергетике проект считается целесообразным, если срок его окупаемости меньше 5 лет.

4.3 Выводы по разделу 4

1 Проведенный анализ литературных источников по проблеме поражения электрическим током человека или животного из-за касания фазного провода 10 кВ в результате его обрыва в сети с изолированной нейтралью показал, что данный вид повреждения электрической сети является опасным для населения и животных, которые могут оказаться около места повреждения воздушной линии.

2 Проведена оценка технико-экономической эффективности системы защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазных проводов, оценена жизнеспособность проекта, исходя из статистики по ЦЭС ОАО «МРСК Урала».

3 Рассчитанный срок окупаемости капитальных вложений позволил нам сделать вывод, что внедрение системы защиты ВЛ-10 кВ является полностью оправданным и целесообразным проектом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе предложено новое решение актуальной научно-технической задачи, состоящее в проведении анализа информационных параметров для построения токовых защит воздушных линий напряжением 6–10 кВ при обрыве фазного провода.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы работы:

1 С целью проведения исследований с учётом работ Хлоповой А.В. разработана компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ с автоматическим выводом результатов исследований в табличной форме.

2 Проведён анализ двух вариантов информационных параметров – отношения тока обратной последовательности к току прямой последовательности I_2/I_1 и тока обратной последовательности I_2 . Исследования проведены при симметричной нагрузке электроприёмников напряжением 380 В, рассмотрены только два режима – нормальный режим работы ВЛ-10 кВ и обрыв фазного провода этой ВЛ.

3 Получены характеристики информационных параметров I_2/I_1 и I_2 и дана оценка их изменений для случаев защиты радиальной ВЛ с сосредоточенной нагрузкой в её конце, магистральной линии с распределённой нагрузкой и отпаечной линии.

4 Проведено сопоставление работы двух защит, использующих информационные параметры I_2/I_1 и I_2 . Показано, что защита, использующая в качестве информационного параметра отношение токов I_2/I_1 , является более эффективной, чем защита, построенная на использовании в качестве информационного параметра ток обратной последовательности I_2 .

5 Для получения объективной оценки работоспособности двух рассматриваемых защит нужно проведение дальнейших исследований, при которых необходимо рассмотреть влияние на информационные параметры следующих факторов:

5.1 Несимметричной нагрузки электроприёмников напряжением 380 В,

5.2 Других видов повреждений электрической сети напряжением 10/0,38 кВ, в частности, различных видов коротких замыканий как сети 10 кВ, так и в сети 380 В.

5.3 Различных конфигураций ВЛ-10 кВ, количества и мощности подключенных ТП, величины их загрузки.

5.4 Влияние на работу устройств защиты соотношение величин уставок защит и изменения нагрузки ВЛ-10 кВ и пр.

6. Проведена оценка технико-экономической эффективности системы защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазных проводов, оценена жизнеспособность проекта, исходя из статистики по ЦЭС ОАО «МРСК Урала».

7. Рассчитанный срок окупаемости капитальных вложений позволил нам сделать вывод, что внедрение системы защиты ВЛ-10 кВ является полностью оправданным и целесообразным проектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Авербух, А.М. Примеры расчётов неполнофазных режимов и коротких замыканий [Текст] / А.М. Авербух. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 184 с.
- 2 АИИС КУЭ Smart IMS [Текст]. Техническая документация. – М.: ООО «Матрица», 2018. – 11 с.
- 3 Алиев, И.И. Электротехнический справочник [Текст] / И.И. Алиев. – 5-е изд., стереотип. – М.: ИП РадиоСофт, 2010. – 384 с.
- 4 Анализ обстоятельств и причин несчастных случаев [Электронный ресурс] / Ростехнадзор. – Режим доступа: http://pech.gosnadzor.ru/info/nesc_sluch/analiz_ns_energo_2014 (дата обращения: 21.11.2016).
- 5 Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов [Текст] / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.
- 6 Ануфриев, И.Е. Matlab 7 [Текст] / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
- 7 Арендт, В.З. Анализ повреждаемости в воздушных сетях 6...35 кВ [Текст] / В.З. Арендт // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 45–48.
- 8 Афонин, В.В. Принципы построения сельских электрических сетей 10 кВ [Текст] / В.В. Афонин, М.Д. Салистра, В.В. Тисленко, В.И. Шевляков // Электрические станции. – 1986. – № 10. – С. 67–69.
- 9 Барг, И.Г. Воздушные линии электропередачи [Текст] / И.Г. Барг, В.И. Эдельман. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
- 10 Барг, И.Г. Совершенствование обслуживания электросетей 0,4–20 кВ в сельской местности [Текст] / И.Г. Барг, Х.Я. Валк, Д.Т. Комаров. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
- 11 Белицын, И.В. Модели внешних воздействий на электромагнитное поле воздушных линий электропередач для аналитико-имитационного моделирования [Текст] / И.В. Белицын // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 49–55.
- 12 Белов, С.И. Многокритериальная оценка стратегии повышения средств электробезопасности сельских электрических сетей 0,38...10 кВ [Текст] / С.И. Белов, Н.Р. Горбунова, Т.Б. Лещинская // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2012. – № 1. – С. 12–15.
- 13 Беляев, А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ [Текст] / А.В. Беляев. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – 230 с.
- 14 Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-102-Д-КЛ-01 [Текст]: Руководство по эксплуатации / НТЦ «Механотроника», 2014. – 42 с.
- 15 Боков, Г. С. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? [Текст] / Г.С. Боков // Новости электротехники. – 2002. – № 2(14).
- 16 Болдырев, И.В. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи в распределительных сетях [Текст] / И.В. Болдырев, Л.В. Владимиров, В.А. Ощепков // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 205–208.

17 Бондаренко, Д.А. Анализ надёжности функционирования воздушных линий электрических сетей [Текст] / Д.А. Бондаренко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2015. – С. 105–112.

18 Вакуумный реклоузер REC15, REC25 [Текст]: Техническая информация. – М.: АО «Таврида Электрик». – 2019. – 155 с.

19 Валеев, Р.Г. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB–SIMULINK [Текст] / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, А.И. Сидоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 116–128.

20 Валеев, Р.Г. Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением до 1000 В при однофазных коротких замыканиях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Валеев Рустам Галимянович. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – 220 с.

21 Васильева, Т.Н. Анализ причин отказов электрического оборудования распределительных сетей 0,38–10 кВ [Текст] / Т.Н. Васильева, Е.И. Лопатин // Вестник РГАТУ. – 2011. – № 3 (11). – С. 64–66.

22 Веников, В.А. Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.

23 Воздушная линия электропередачи с фильтром выявления несимметричного режима [Текст]: а. с. 1192029 СССР: МПК: Н 02 J 3/00, Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/16. / И.Г. Беляков, Р.Ш. Сагутдинов, Л.Д. Суров (СССР). – № 3758292/24-07; заявл. 22.05.1984; опубл. 15.11.1985, Бюл. № 42. – 7 с.

24 Воздушная линия электропередачи трёхфазного переменного тока в сети с изолированной нейтралью [Текст]: а. с. 864425 СССР: МПК Н 02 J 3/00, Н 02 Н 5/10 / Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов. – № 2798299/24-07; заявл. 18.07.1979; опубл. 15.09.1981, Бюл. № 34. – 3 с.

25 Воротницкий, В. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6(10) кВ [Текст] / В. Воротницкий, С. Бузин // Новости электротехники. – 2005. – № 3(33).

26 Геоинформационная система ОМП ВЛ и КЛ 6–35 кВ (ГИС ОМП) [Электронный ресурс] / Релематика. – Режим доступа: https://relematika.ru/produkt/6-35_kv/geoinformatsionnaya_sistema_omp_vl_i_kl_6_35_kv_gis_omp/ (дата обращения: 23.03.2019).

27 Город. Сильнейший ледяной дождь [Электронный ресурс] / 74.ru. – Режим доступа: <https://74.ru/text/gorod/858036.html> (дата обращения: 23.03.2019).

28 Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей [Текст] / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Ата: Кайнар, 1984. – 128 с.

29 Гулидов, С.С. Техничко-экономическая характеристика сельских электрических сетей [Текст] / С.С. Гулидов. – М.: Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. – С. 100–101.

30 Гулидов, С.С. Техничко-экономический анализ надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей [Текст] / С.С. Гулидов. – Орел: Вестник аграрной науки, 2012. – С. 144–146.

31 Дементьев, Ю.А. О состоянии электротехнического оборудования и ВЛ ОАО «ФСК ЕЭС» и мерах по повышению сетевой надежности [Текст] / Ю.А. Дементьев, В.А. Родионов // Сб. докл. конф. ТРАВЭК «Интеграция науки и производства» (26–28 мая 2004 г). – М.: ВЭИ, 2004.

32 Демченко, В. Распределение электроэнергии – самый проблемный и затратный этап [Текст] / В. Демченко // Новости электротехники. – 2002. – № 5(17).

33 Довженко, С.В. Диагностика повреждений в электрических сетях 10 (6) кВ [Текст] / С.В. Довженко // Современные сложные системы управления: материалы XII международной научно-практической конференции, 25–27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч. 2. – Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. – С. 114–117.

34 Долин, П.А. Электробезопасность. Теория и практика [Текст]: учебное пособие для вузов / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Ворочков, А.Ф. Монахов; под ред. В.Т. Медведева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 280 с.

35 Дорофеев, Н.П. Анализ причин несчастных случаев на энергоустановках с 1 января 2001 по 1 мая 2005 года (по статистическим данным) [Текст] / Н.П. Дорофеев, В.Л. Титов, Б.М. Степанов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2005. – № 3. – С. 3–8.

36 Егоров, А.А. VII Международная научно-практическая конференция «Автоматизация и информационные технологии в энергетике 2017». Обзор. Часть 5 [Текст] / А.А. Егоров // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2018. – № 6 (107). – С. 10–24.

37 Ершов, А.М. Классификация защит воздушных линий напряжением 6–10 кВ от обрывов проводов [Электронный ресурс] / А.М. Ершов, А.В. Хлопова, Н.Ю. Хабаров // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. – С. 784–791.

38 Ершов, А.М. Методика проведения экспериментальных исследований параметров электрической сети напряжением 10/0,38 кВ при различных режимах её работы [Текст] / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Хлопова // Электробезопасность. – 2016. – № 3. – С. 27–36.

39 Ершов, А.М. Моделирование системы обеспечения электробезопасности при обрыве одной из фаз [Текст] / А.М. Ершов, А.В. Хлопова, А.И. Сидоров // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2018. – № 3 (36). – С. 134–145.

40 Ершов, А.М. О выборе информационного параметра и места установки защиты при обрыве фазного провода воздушной линии напряжением 6–10 кВ [Электронный ресурс] / А.М. Ершов, А.В. Хлопова // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность: сборник материалов научно-практической конференции. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2017. – С. 31–38.

41 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. 3–18.

42 Ершов, А.М. Сигнализация о возникновении обрыва фазного провода воздушной линии напряжением 6–10 кВ [Текст] / А.М. Ершов, А.В. Хлопова, А.И. Сидоров // Электрические станции. – 2017. – № 12. – С. 34–40.

43 Ершов, А.М. Система защиты электрической сети напряжением 380 В от обрывов проводов воздушной линии [Текст] / А.М. Ершов, О.В. Филатов, А.В. Млоток и др. // Электрические станции. – 2016. – № 5. – С. 28–33.

44 Ершов, А.М. Устройство сигнализации о возникновении обрыва фазного провода воздушной линии напряжением 6–10 кВ [Текст] / А.М. Ершов, А.В. Хлопова // Электробезопасность. – 2017. – № 2. – С. 11–15.

45 Ершов, А.М. Физическая модель для исследования несимметричных режимов работы электрической сети напряжением 380 В [Текст] / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Энергетика в современном мире: Сборник статей VI Международной заочной научно-практической конференции. – Чита: ЗабГУ, 2013. – С. 46–52.

46 Ершов, А.М. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ [Текст] / А.М. Ершов, А.В. Хлопова // Электробезопасность. – 2016. – № 2. – С. 13–21.

47 Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Текст]: руководство для практических расчётов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

48 Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

49 Кабашов, В.Ю. Анализ повреждаемости проводов сельских ВЛ 10 (6) кВ при воздействии неблагоприятных климатических факторов [Текст] / В.Ю. Кабашов // Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции (15 мая 2015 г., г. Уфа). В 2 ч. Ч.2. – Уфа: АЭТЕРНА, 2015. – С. 41–42.

50 Кабашов, В.Ю. Исследование причин аварийных отключений сельских ВЛ 6–10 кВ [Текст] / Ю.В. Кабашов // Инновационная наука. – 2017. – Т.3. – № 4. – С. 70–74.

51 Кабашов, В.Ю. Исследование условий возможного схлестывания проводов сельских ВЛ 6–10 кВ [Текст] / В.Ю. Кабашов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 2, Т. 9. – С. 9–12.

52 Карчин, В.В. Проблемы защиты линий электропередач от атмосферных перенапряжений [Текст] / В.В. Карчин, В.Т. Сидорова // Электрика. – 2014. – № 6. – С. 20–23.

53 Каталог электротехнического оборудования [Текст]. – М.: Таврида электрик. – 2018. – 131 с.

54 Клочков, А.Н. Устройство для обнаружения трёхфазных сетей с обрывом фазного провода [Текст] / А.Н. Клочков // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 1. – С. 221–223.

55 Млоток, А.В. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В / А.В. Млоток, А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.И. Сидоров. – Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2014. – № 2 (19). – С. 96–107.

56 Комплектное устройство защиты и автоматики линии 6–35 кВ типа «ТОР 200 Л 22» («ТОР 200 Л 12», «ТОР 200 Л 32», «ТОР 200 Л 62») [Текст]. – Чебоксары: ООО «Релематика», 2018. – 69 с.

57 Концепция проекта «Цифровой РЭС». Опыт реализации: Янтарьэнерго [Электронный ресурс] / НТЦ «Энерджинет». – Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2017/11/Tavrida-Elektrik-EnergyNet-TSPS-Kontseptsiya-TSRES.pdf> (дата обращения: 02.02.2019).

58 Крючков, И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.

59 Кучерявенков, А.А. Как вернуть людям свет? [Текст] / А.А. Кучерявенков, Е.А. Кондрашенко // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 5 (38). – С. 74–75.

60 Кучерявенков, А.А. Экономическая эффективность внедрения индикаторов короткого замыкания в распределительных сетях 6–35 кВ [Текст] / А.А. Кучерявенков, Е.А. Карташёва // Энергоэксперт. – 2014. – № 6. – С. 52–53.

61 Лещинская, Т.Б. Концепция развития систем электроснабжения сельских районов [Текст] / Т.Б. Лещинская, В.И. Шевляков // Электрика, 2004. – № 6. – С. 13–17.

62 Лещинская, Т.Б. Многокритериальная оценка технико-экономического состояния распределительных электрических сетей [Текст] / Т.Б. Лещинская, В.В. Князев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2010. – №2. – С. 14–19.

63 Правила устройства электроустановок. Изд. 6-е и 7-е. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 608 с.

64 Хлопова, А.В. Анализ причин обрывов фазных проводов воздушных линий напряжением 6–10 кВ [Текст] / А.В. Хлопова // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 4. – С. 38–43.

65 Хлопова, А.В. Исследование режимных параметров при обрывах воздушных линий напряжением 6–10 кВ [Текст] / А.В. Хлопова // Электроэнергетика глазами молодёжи: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19–23 сентября 2016 г., Казань. – В 3 т. Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 242–245.

66 Электрические системы. Электрические сети: учеб. для электроэнерг. спец. вузов / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.: под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А Обзор существующих методов защиты от обрывов фазных проводов

В связи с тем, что в существующих сетях России преимущественно старое оборудование и устройства релейной защиты преимущественно электромеханического типа (РТ-40, РТ-85), возникает проблема в правильном срабатывании защит с необходимой выдержкой времени.

Но, также есть и новые подстанции, построенные на современном микропроцессорном оборудовании.

В качестве таких микропроцессорных устройств для защиты ВЛ-10 кВ используется ТОР 200-Л и БМРЗ, подключаемые ко вторичным цепям трансформатора тока защищаемого присоединения.

Обе защиты предусматривают ЗОФ по току обратной последовательности, так как подлежат установке в начале отходящего фидера.

Также стоит упомянуть про то, что большинство сетей 10 кВ являются преимущественно сетями кольцевого типа, то есть передача электроэнергии осуществляется от нескольких источников питания. Отсюда возникает вопрос о создании селективности срабатывания защит в данных сетях. С этой целью производится установка реклоузеров на потребительских отпайках ВЛ 6-10кВ.

Не смотря на возможность использования данной защиты при помощи задания соответствующих уставок, данные функции микропроцессорных счетчиков остаются выведенными из строя.

Обзор авторских свидетельств и патентов о защите изолированных сетей напряжением 6–10 кВ

При обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ происходит искажение векторной диаграммы линейных и фазных напряжений, исчезает ток повреждённой фазы [50, 56] – это может быть использовано для построения защиты ВЛ от обрыва фазного провода.

Защита, построенная на контроле величин линейных напряжений. При обрыве фазного провода ВЛ за местом обрыва деформируется треугольник линейных напряжений, при этом два линейных напряжения становятся равными половине линейного напряжения [2]. Изменения линейных напряжений позволяют выявлять обрыв фазного провода (рисунок А.1).

Защиты, построенные на использовании сравнения величин токов. В устройстве, содержащем дифференциальное реле, реагирующим на разность двух токов, получаемых от включённых в контролируемую сеть трансформаторов тока (рисунок А.2) и пропорциональных один току одной фазы сети, а другой – разности токов двух других фаз [5]. При нормальном режиме работы ВЛ разность токов равна нулю, а при возникновении обрыва любого провода и исчезновении соответствующего тока баланс токов нарушается и дифференциальное реле срабатывает.

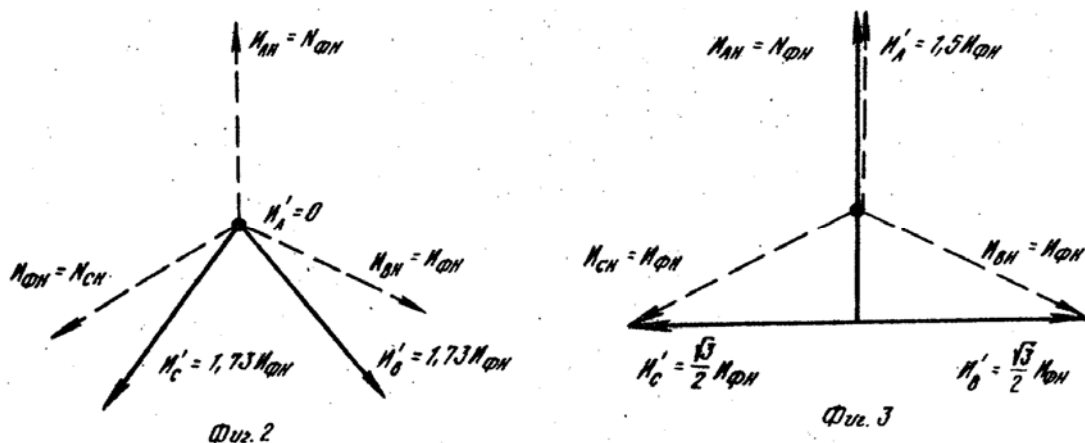


Рисунок А.1 – Векторные диаграммы устройства для защиты от однофазных повреждений в электрической сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ (фиг. 2) и обрыве провода за местом обрыва (фиг. 3)

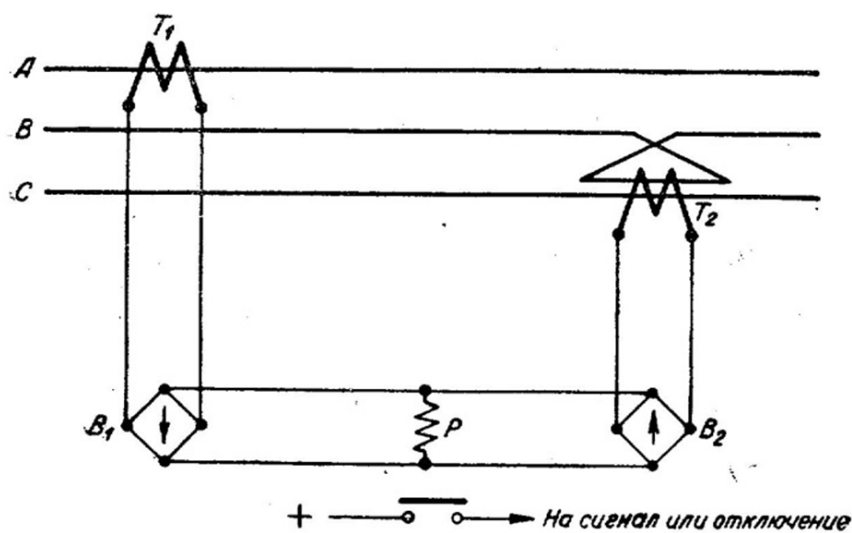


Рисунок А.2 – Устройство для защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью от обрыва фазы

Для сравнения токов в устройстве [7] используется четырёхкатушечный электромагнит, две катушки которого включены в одну из фаз контролируемой сети, а две другие – в остальные фазы, в результате чего намагничивающие силы компенсируют друг друга. При обрыве любой из фаз равновесие магнитной системы электромагнита нарушается и формируется команда на отключение ВЛ.

Защиты, построенные на контроле напряжений ВЛ с помощью антенных фильтров. Для определения обрыва фазного провода или однофазного замыкания на землю используют два антенных фильтра (антенные преобразователи напряжения) одной ВЛ, расположенных симметрично под проводами воздушной линии [29], представленные на рисунке А.3. При нормальном режиме работы ВЛ сигналы антенных фильтров равны и взаимно компенсируются, а при возникновении несимметрии сети (при однофазном замыкании на землю или обрыве провода) равенство сигналов нарушается и формируется сигнал, несущий информацию о возникновении несимметрии.

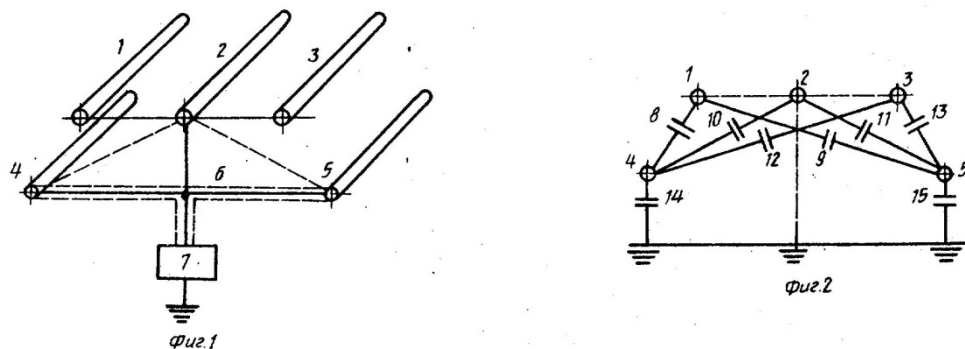


Рисунок А.3 – Взаимное расположение токопроводов и антенных преобразователей напряжения (фиг.1); схема замещения (фиг. 2)

При обрыве фазного провода в напряжениях и токах электрической сети появляются составляющие нулевой и обратной последовательностей [50, 56], которые могут быть использованы для построения защиты ВЛ от обрыва фазного провода.

Защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности электрической сети с изолированной нейтралью. В устройствах [46, 47, 49] для выявления обрыва фазного провода используются два трансформатора, устанавливаемых в начале и конце воздушной линии, нейтральные выводы первичных обмоток со схемой соединения «звезда» этих трансформаторов через активно-емкостные фильтры нулевой последовательности соединены с «землей» – в результате организуется контур для циркуляции токов нулевой последовательности (рисунок А.4). При обрыве фазного провода токи нулевой последовательности вследствие несимметрии фаз электрической сети возрастают, что служит информацией для исполнительного органа защиты.

При неполнофазных режимах (обрыв провода, обрыв провода с замыканием на землю, перегорание предохранителей в одной из фаз) появляются токи обратной последовательности, равные по величине токам прямой последовательности [18, 19]. При нормальном режиме ВЛ токи обратной последовательности отсутствуют. Измеряя нагрузочный ток ВЛ, например, с помощью индукционного измерителя, выделяя из него с помощью фильтров составляющие токов прямой и обратной последовательностей, сравнивая их по величине, распознают нормальный и аварийный режимы работы ВЛ. Логическая структура устройства представлена на рисунке А.5.

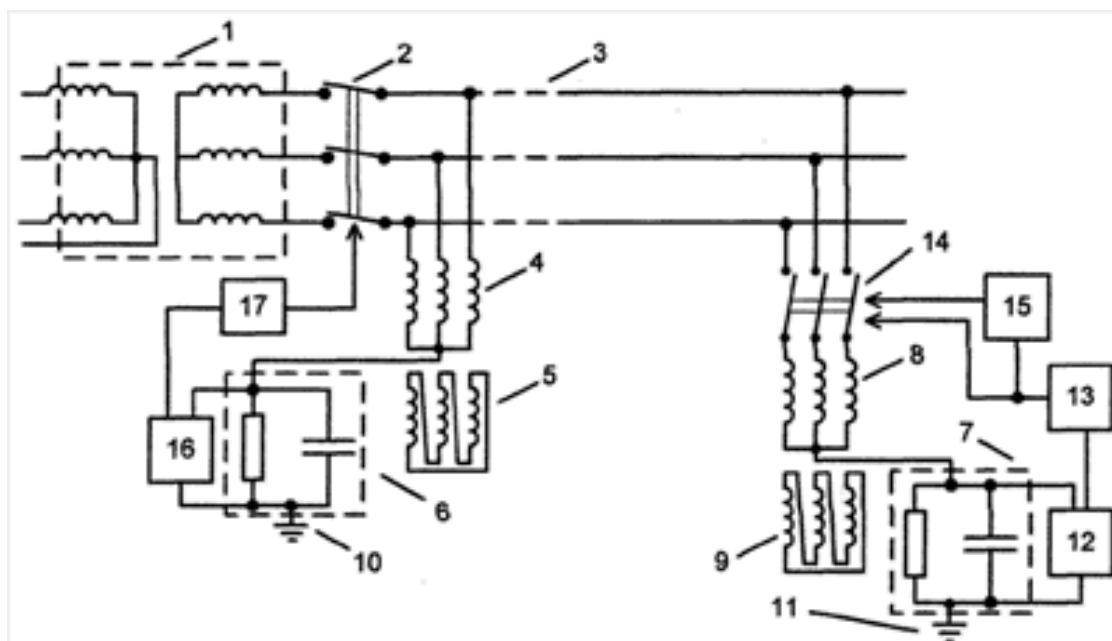


Рисунок А.4 - Устройство определения обрыва изолированных проводов воздушных линий напряжением свыше 1000 В при их расположении на опорах контактной сети переменного тока в зонах сближения с высоковольтными ЛЭП

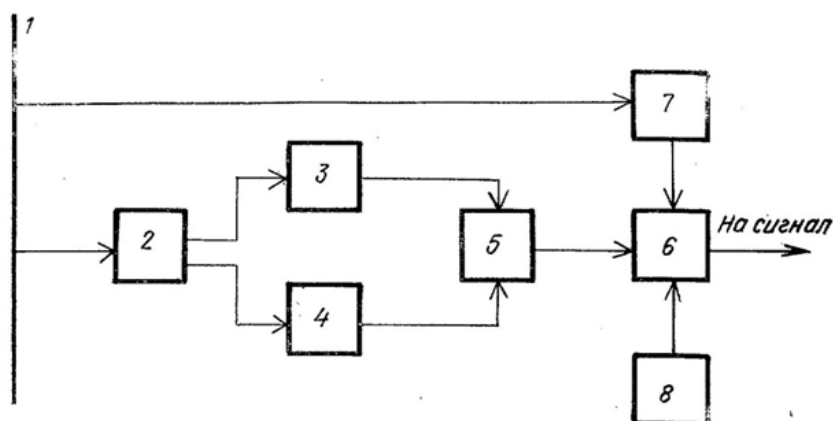


Рисунок А.5 – Способ обнаружения неполнофазных режимов в воздушных электрических сетях с изолированной нейтралью

Защиты, использующие два антенных фильтра напряжения нулевой последовательности, устанавливаемых по разные стороны защищаемого объекта. Для выявления обрыва фазы по обе стороны от защищаемого объекта устанавливаются два антенных (ёмкостных) фильтра нулевой последовательности, которые по дифференциальной схеме подключены к исполнительному органу [23, 25, 26, 27], представленных на рисунке А.6. При нормальном режиме работы выходные сигналы антенных фильтров равны нулю, а при обрыве фазы на защищаемом объекте на выходе антенного фильтра, расположенного за объектом, появляется сигнал, пропорциональный напряжению нулевой последовательности и подаваемый на исполнительный орган устройства защиты.

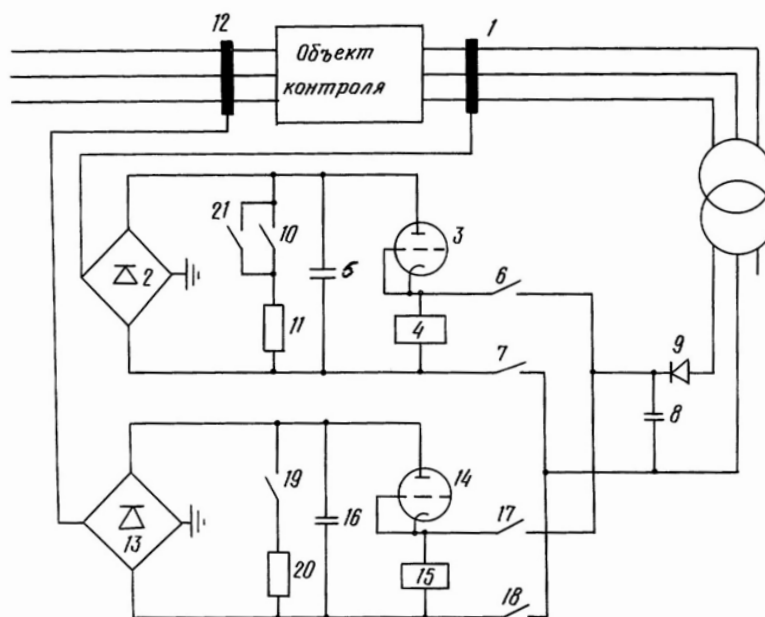


Рисунок А.6 – Устройство для контроля неполнофазных режимов работы электрической сети [27]

Защита, построенная на сравнении напряжений нулевой последовательности здоровой и поврежденной ВЛ. В устройстве [12], в котором в качестве нуль-органа используется фильтр напряжения нулевой последовательности, на два входа которого подаются напряжения с двух ВЛ, отходящих от одной подстанции. При нормальном режиме работы ВЛ их уровни напряжений нулевой последовательности одинаковы и выходной сигнал нуль-органа отсутствует. При обрыве фазного провода в какой-либо ВЛ в ней возрастает напряжение нулевой последовательности, нуль-орган срабатывает и указывает поврежденную ВЛ.

Защита, использующая фильтры напряжений обратной и нулевой последовательности, установленные в сети 10 кВ. В конце ВЛ-10 кВ под проводами установлены два индукционных фильтра токов – один нулевой последовательности, а второй комбинированный нулевой и обратной последовательностей [10]. При однофазном замыкании на землю в электрической сети возникают только токи нулевой последовательности, а при обрыве фазного провода – токи нулевой и обратной последовательности. Соответственно первый фильтр выявляет только однофазные замыкания на землю, а второй фильтр реагирует как на однофазные замыкания на землю, так и обрывы фазного провода. Построенная определенным образом логическая часть исполнительного органа устройства защиты позволяет идентифицировать отдельно однофазное замыкание и обрыв фазного провода.

Защиты, использующие фильтр обратной последовательности и фильтр нулевой последовательности, установленные в электрической сети напряжением 380 В. Фильтры установлены на стороне низшего напряжения силового трансформатора напряжением 6–10/0,38 кВ [41, 48]. При обрыве фазного провода в электрической сети напряжением 6–10 кВ в сети возникают напряжения обратной и нулевой последовательностей, но в электрическую сеть 380 В напряжения нулевой последовательности не трансформируются, поэтому данное повреждение будет

чувствовать только фильтр напряжения обратной последовательности и, следовательно, при отсутствии сигнала с фильтра нулевой последовательности его выходной сигнал будет нести информацию об обрыве провода ВЛ. При обрыве фазного провода электрической сети напряжением 380 В за местом повреждения появляются напряжения обратной и нулевой последовательности и оба фильтра, если они установлены в конце воздушной линии, почувствуют свои составляющие и, следовательно, появление выходных сигналов с обоих фильтров будет нести информацию об обрыве провода ВЛ-380 В. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке А.7.

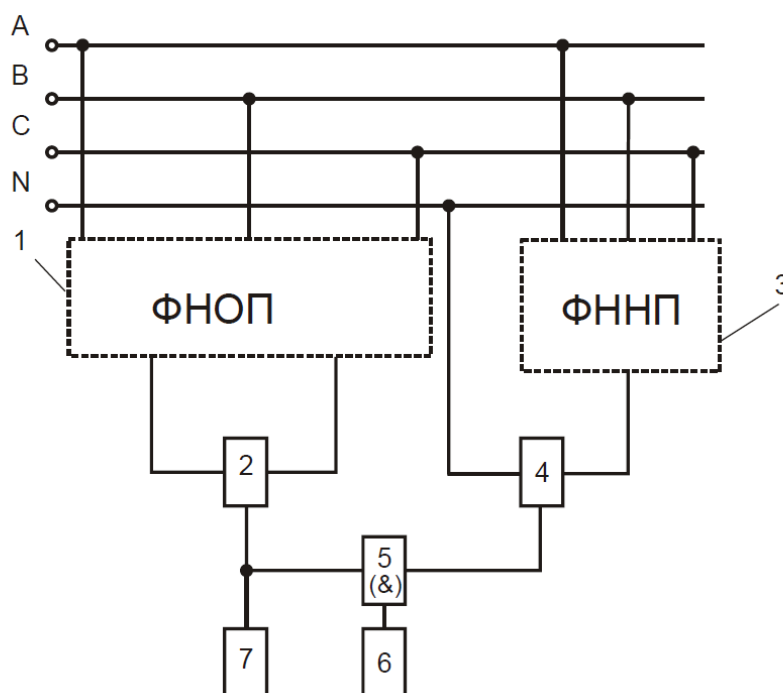


Рисунок А.7 - Принципиальная схема устройства обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода [41]

Защита, использующая фильтр напряжения нулевой последовательности, установленный в конце ВЛ-10 кВ перед силовым трансформатором 10/0,38 кВ, и фильтр напряжения обратной последовательности, установленный в электрической сети напряжением 380 В [24]. При однофазном замыкании на землю в электрической сети напряжением 6–10 кВ в сети появляются напряжения нулевой последовательности, а при обрыве провода ВЛ появляются напряжения нулевой и обратной последовательности, но через силовой трансформатор проходят только напряжения обратной последовательности. Следовательно, антенный фильтр напряжения нулевой последовательности (2) будет фиксировать однофазные замыкания на землю и обрывы фазных проводов ВЛ, фильтр напряжений обратной последовательности (5) будет реагировать только на обрывы фазных проводов ВЛ. Построенная определённым образом логическая часть исполнительного органа устройства защиты позволяет идентифицировать отдельно однофазное замыкание и обрыв фазного провода (рисунок А.8).

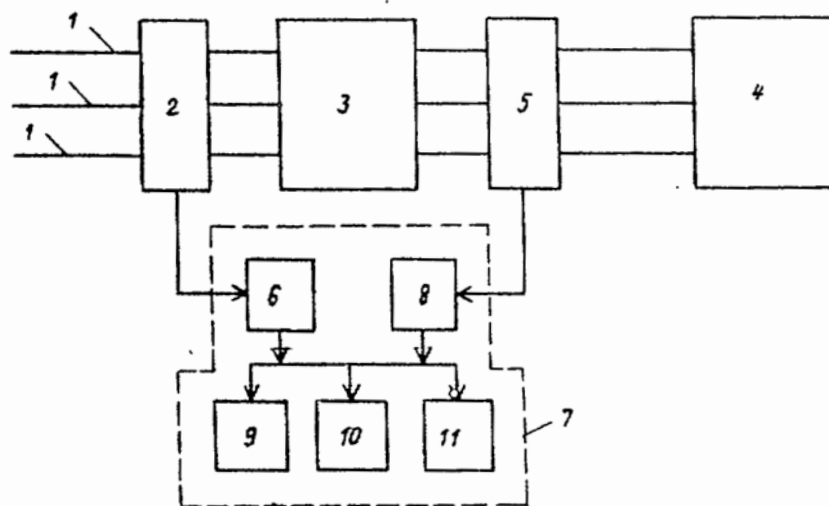


Рисунок А.8 – Блок схема устройства

Защита, построенная на измерении частоты пульсаций выпрямленного напряжения. С помощью датчиков Холла, установленных вблизи фазных проводов, выпрямителя и фильтра контролируется частота пульсаций на выходе выпрямителя [20]. При нормальном режиме работы частота равна 150 Гц, а при обрыве провода – 100 Гц. При изменении частоты срабатывает исполнительный орган устройства защиты.

Защиты, построенные на использовании напряжений фаз сети относительно земли и напряжения нейтрали. Указанные напряжения, получаемые от трёхфазного трёхобмоточного трансформатора напряжения, анализируются по величине, сравниваются с определёнными уставками по напряжению и далее с использованием логических схем фиксируют фазу (рисунок А.9), в которой произошло однофазное замыкание или произошёл обрыв фазного провода [1, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 13, 28].

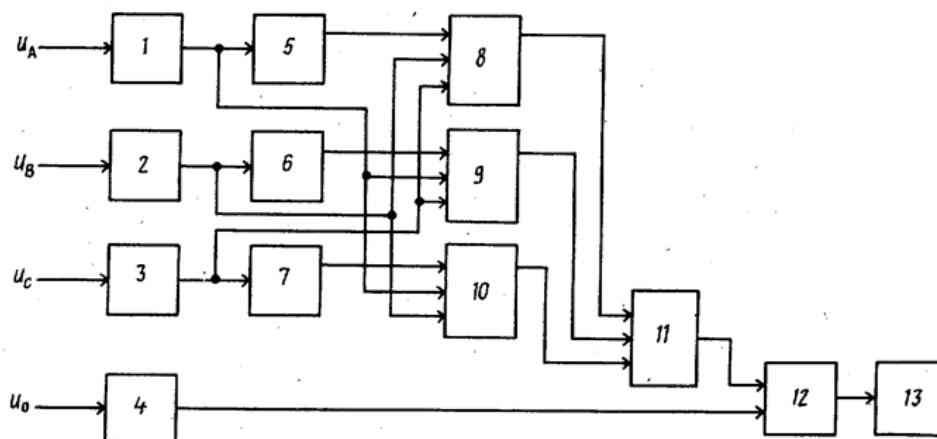


Рисунок А.9 – Схема устройства для сигнализации аварийных и неполнофазных режимов в электрических сетях [28]

Защиты, построенные на измерении симметрии напряжений фаз. При наличии напряжений на всех трёх фазах электрической сети на выходах фильтров

нулевой последовательности (7), различного рода выпрямителей [16, 17, 21, 22] выходной сигнал равен нулю. При исчезновении какого-либо напряжения появляющийся выходной сигнал запускает исполнительный орган устройства защиты.

Защиты, построенные на измерении симметрии нагрузочных токов. Три трансформатора тока, вторичные обмотки которых соединены по схеме фильтра токов нулевой последовательности [14, 15], позволяют выявлять работу электрической сети в двухфазном режиме.

Приложение Б Компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ

Запись уравнений состояний электрической сети напряжением 10/0,38 кВ с учётом всех указанных выше факторов и их аналитическое исследование режимов работы в различных её точках представляется сложной и трудоёмкой задачей. Это объясняется множеством возможных режимов, каждый из которых описывается своими уравнениями состояния сети.

Даже при успешном решении такой задачи, аналитические выражения для определения напряжений в узлах сети и токов в ветвях получаются громоздкими, включающими в себя большое количество независимых переменных. Использование таких выражений для выявления степени влияния каждого из перечисленных факторов на величину и фазу напряжений фаз сети относительно нулевого провода $U_{\Phi_i, N}$ и нулевого провода относительно земли (обозначим буквой «t») $U_{N, t}$, а также токов в электрической сети и других режимных параметров потребует не меньших усилий и объёма вычислений, чем прямое решение систем уравнений, описывающих состояние электрической 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 было практически невозможно.

1 В настоящее время для решения подобных задач широко используется программный комплекс MATLAB, который является мощным и универсальным средством решения задач, возникающих в различных областях человеческой деятельности [32, 60].

2 Пакет Simulink, поставляемый вместе с комплексом MATLAB, предназначен для интерактивного моделирования достаточно сложных систем, состоящих из стандартных блоков. Он позволяет реализовать по существу визуально-ориентированное программирование задач автоматического составления графической модели системы или устройства, составления и решения её уравнений состояния и наглядного представления результатов моделирования. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя [59].

Программный комплекс MATLAB с пакетом Simulink предоставляет исследователю самые различные возможности, начиная от структурного (математического) представления системы и заканчивая макетированием системы в реальном времени.

Исследования режимов работы электрической сети проводятся с целью анализа изменений напряжений и токов, а также их симметричных составляющих при обрывах фазных проводов воздушной линии напряжением 10 кВ, которые могут быть использованы для распознавания аварийных режимов работы электрической сети и построения соответствующих устройств защиты.

На рисунке Б.1 представлена принципиальная схема трёхфазной электрической сети, состоящей из источника питания напряжением 10 кВ (например, подстанции

напряжением 110/10 кВ), воздушной линии напряжением 10 кВ (ВЛ-10 кВ), понижающего трёхфазного трансформатора Т, четырёхпроводной воздушной линии напряжением 380 В (ВЛ-380 В) и нагрузки потребителей электрической энергии в конце линии.

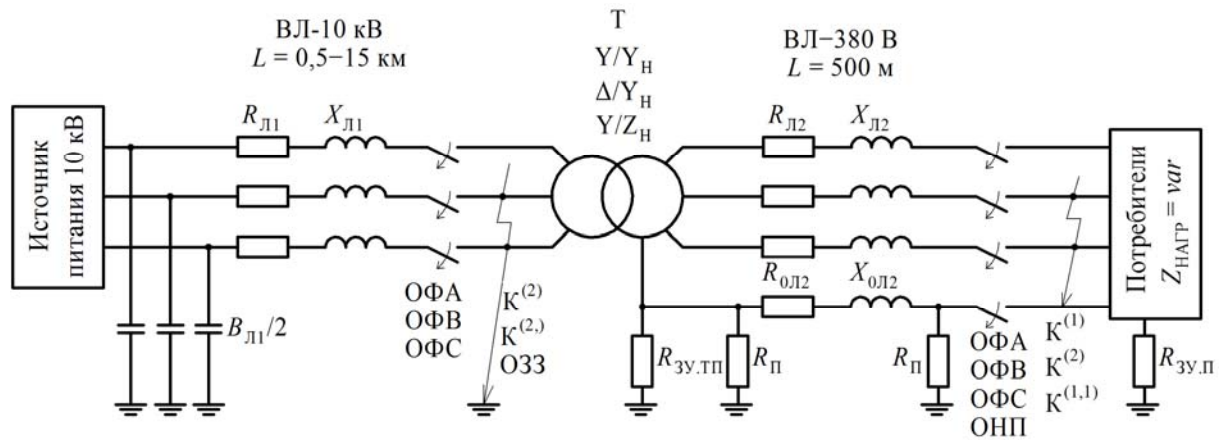


Рисунок Б.1 – Схема электрической сети напряжением 10/0,38 кВ

На схеме обозначено: $R_{Л1}$, $X_{Л1}$ и $B_{Л1}/2$ – активное и индуктивное сопротивления, ёмкостная проводимость (показанная для удобства только с одной стороны) ВЛ-10 кВ; $R_{Л2}$, $X_{Л2}$ – активное и индуктивное сопротивления фазных проводов ВЛ-380 В; $R_{0Л2}$, $X_{0Л2}$ – активное и индуктивное сопротивление нулевого провода ВЛ-380 В; $R_{ЗУ.ТП}$, $R_{П}$, $R_{ЗУ.П}$ – сопротивления заземляющих устройств трансформаторной подстанции, повторных заземлений нулевого провода ВЛ-380 В и потребителя электроэнергии; Y/Y_H , Δ/Y_H , Y/Z_H – виды соединения обмоток трансформатора Т; $Z_{НАГР} = var$ – сопротивление нагрузки потребителя, меняющееся в широких пределах как по величине, так и по фазам; ОФА, ОФВ, ОФС – обрывы фазы, соответственно, А, В, С; $K^{(2)}$, $K^{(2,1)}$ и ОЗЗ – двухфазное короткое замыкание, двухфазное КЗ на землю и однофазное замыкание на землю ВЛ-10 кВ; $K^{(1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$ – виды КЗ в ВЛ-380 В – однофазное, двухфазное и двухфазное КЗ на землю; ОФН – обрыв нулевого провода.

В программном комплексе MATLAB с использованием пакета Simulink построена компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ (рисунок Б.2). За основу взята разработанная ранее модель электрической сети напряжением 0,38 кВ, описанная в [34].

Для построения модели используются стандартные блоки библиотеки Simulink:

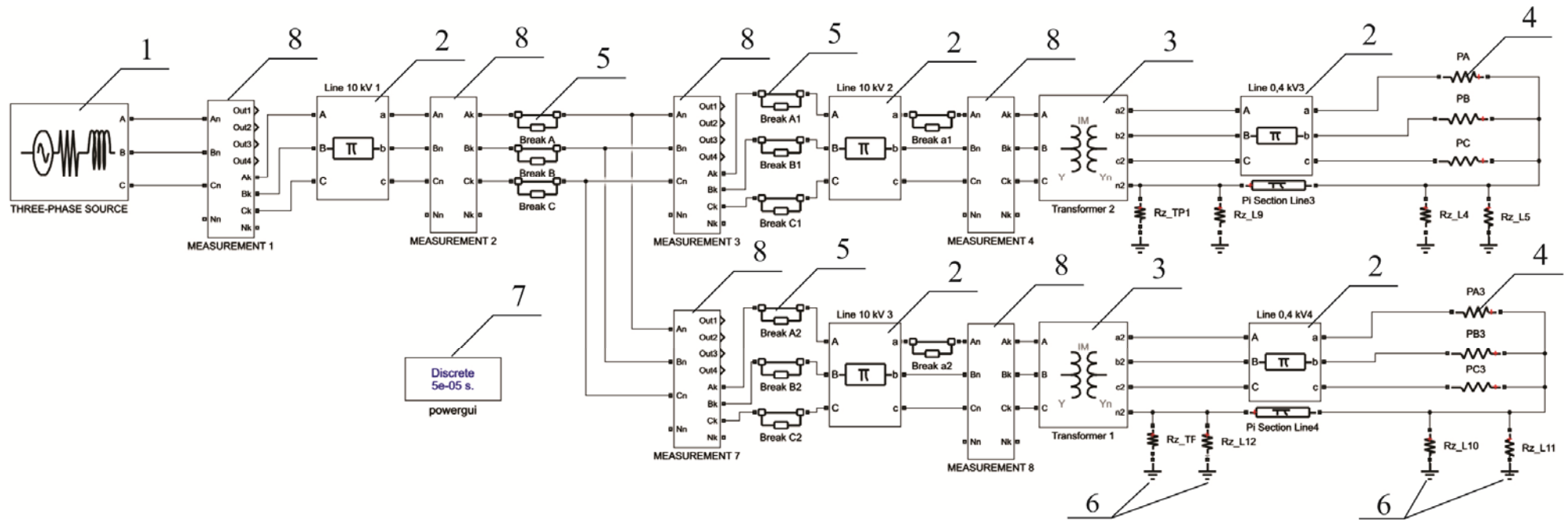


Рисунок Б.2 – Компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ

- 8 – Three-Phase Source – моделирует трёхфазный источник питания;
- 9 – Three-Phase PI Section Line и PI Section Line – моделирует трёхфазную и однофазную линию с сосредоточенными параметрами;
- 10 – Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings) – моделирует трёхфазный двухобмоточный трансформатор с различной конфигурацией обмоток и геометрией магнитопровода;
- 11 – Parallel RLC Load – моделирует нагрузочную ветвь;
- 12 – Breaker – моделирует обрыв фазы линии;
- 13 – Series RLC Branch – моделирует последовательную RLC-цепь (в данной модели используется для моделирования активного сопротивления различного рода заземляющих устройств);
- 14 – Powergui – является инструментом графического интерфейса.

Также в модели использованы дополнительные подсистемы 8, объединяющие в себе стандартные измерительные блоки, позволяющие проводить измерения напряжений и токов и их симметричных составляющих как по величине, так и по фазе в различных точках сети.

Параметры, задаваемые в блоках модели, рассчитаны по известным методикам [34].

Данная компьютерная модель предоставляет широкие возможности для исследований. Она позволяет моделировать такие режимы, которые достаточно сложно организовать в реальной электрической сети, и которые небезопасны для людей и животных, находящихся рядом с воздушной линией. Такими режимами могут быть обрывы проводов как ВЛ-10 кВ, так и ВЛ-380 В, различного вида КЗ и др.

В компьютерной модели заключены возможности изменения в широких пределах параметров электрической сети напряжением 10/0,38 кВ.