

МИНИСТЕРСТВО 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

\_\_\_\_\_ Р.Ф. Гайсин  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующая кафедрой ЭССиСЭ

\_\_\_\_\_ И.М. Кирпичникова  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ  
ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ  
СЧЁТЧИКОВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ-13.04.02.2017.044.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР  
доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ А.М. Ершов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор ВКР  
студент группы П-285

\_\_\_\_\_ С. Е. Скоринов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер  
старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Н.Ю. Аверина  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Министерство 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  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017г.

### ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента  
Скоринова Сергея Евгеньевича  
Группа – П-285

1 Тема работы «Исследование защиты от обрывов проводов воздушной линии напряжением 380 В с помощью микропроцессорных счётчиков»

Утверждена приказом ректора ЮУрГУ от 28 апреля 2017 г., № 835

Срок сдачи студентом законченной работы – 01.06.2017 г.

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

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке:

1 Введение

2 Анализ состояния вопроса и обоснование задач исследования

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

4 Разработка системы защиты ВЛ-380 В от обрывов фазных проводов

5 Оценка условий электробезопасности и технико-экономической эффективности при использовании системы защиты ВЛ-380 В от обрывов фазных проводов

6 Заключение

4 Дата выдачи задания: 7 сентября 2015 г.

Научный руководитель \_\_\_\_\_ / А.М. Ершов /

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ / С.Е. Скоринов /

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметки руководителя о выполнении
1	Введение	15.09.2016	
2	Анализ состояния вопроса и обоснование задач исследования	04.10.2016	
3	Исследования режимов работы электрической сети напряжением 10/0,38 кВ	10.01.2017	
4	Разработка системы защиты ВЛ–380 В от обрывов фазных проводов	15.02.2017	
5	Оценка условий электробезопасности и технико-экономической эффективности при использовании системы защиты ВЛ–380 В от обрывов фазных проводов	14.03.2017	
6	Заключение	25.04.2017	
7	Библиографический список	07.05.2017	
8	Оформление пояснительной записки	20.05.2017	
9	Сдача готовой работы на кафедру, представление работы на рецензию	01.06.2017	

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ \_\_\_\_\_ / И.М. Кирпичникова /

Научный руководитель работы \_\_\_\_\_ / А.М. Ершов /

Магистрант \_\_\_\_\_ / С.Е. Скоринов /

## АННОТАЦИЯ

Скоринов С.Е. Исследование защиты от обрывов проводов воздушной линии напряжением 380 В с помощью микропроцессорных счётчиков. – Челябинск: ЮУрГУ, Э, 2017, 101с., 49 рис., 22 табл., библиогр. список – 60 наим.

Ключевые слова: воздушная линия напряжением 380 В; обрывы нулевого и фазных проводов; однофазные короткие замыкания.

Объект исследования – воздушные линии электропередачи напряжением 380 В при возникновении в них обрывов фазных и нулевого проводов.

Предмет исследования – получение закономерных результатов в изменении напряжений сети при возникновении обрывов фазных и нулевого проводов, которые позволят разработать защиту от указанных режимов.

Цель работы – создание системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В.

Новизна выпускной квалификационной работы заключается в том, что:

1 Для определения параметров системы защиты проведены исследования изменений напряжений и токов при различных режимах работы электрической сети с использованием компьютерного и физического моделирования. Результаты подтверждены экспериментами в опытной электрической сети.

2 Разработаны критерии выявления различных режимов работы воздушной линии напряжением 380 В. Найден алгоритм изменения токов, возникающих при обрыве фазных и нулевого проводов в воздушных линиях электрических сетей напряжением 380 В, а также определена логика выявления этих обрывов.

3 Предложены дополнительные функции для микропроцессорного счетчика электрической энергии с целью его использования в качестве системы защиты при обрывах проводов воздушной линии напряжением 380 В.

Работа может представлять интерес для организаций, проектирующих и эксплуатирующих системы электроснабжения.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	
1.1 Электрическая сеть напряжением 380 В.....	8
1.2 Режимы работы электрической сети напряжением 380 В.....	9
1.3 Распределение токов электрической сети напряжением 380 В.....	14
1.4 Актуальность защиты ВЛ-380 В при обрывах фазных проводов и нулевого проводов.....	17
1.5 Задачи исследований.....	19
Выводы по разделу 1.....	19
2 ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,38 кВ.....	20
2.1 Режимные параметры электрической сети.....	20
2.2 Исследования на компьютерной модели.....	34
2.3 Исследования на физической модели.....	34
2.4 Исследования в опытной электрической сети.....	34
2.5 Анализ параметров электрической сети при различных режимах работы.....	40
2.5.1 Нормальный режим работы и изменение несимметрии нагрузок сети.....	40
2.5.2 Обрыв фазного провода и изменение несимметрии нагрузок сети.....	44
2.5.3 Обрыв фазного провода и изменение несимметрии нагрузок сети.....	48
2.6 Обобщённые характеристики режимных параметров сети.....	50
Выводы по разделу 2.....	50
3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВЛ-380 В ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ.....	54
3.1 Обзор методов и средств защит ВЛ-380 В от обрывов фазных проводов.....	54
3.2 Возможность использования микропроцессорных счетчиков для выявления обрывов фазных проводов.....	65
3.3 Описание системы защиты ВЛ-380 В от обрывов фазных проводов..	66
Выводы по разделу 3.....	67
4 ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВЛ-380 В ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ.....	69
4.1 Оценка условий электробезопасности.....	69
4.1.1 Поражение человека электрическим током при касании оборванного фазного провода.....	69
4.1.2 Поражение человека электрическим током при касании оборванного нулевого провода.....	74

4.2 Оценка технико-экономической эффективности.....	80
4.2.1 Оценка движущих и сдерживающих сил и ресурсов разработки проекта защиты ВЛ–380 В от обрыва фазного и нулевого проводов при помощи счетчиков.....	81
4.2.2 STEP-анализ для факторов внешней среды проекта.....	81
4.2.3 SWOT-анализ необходимости реализации проекта.....	82
4.2.4 Планирование целей проекта в дереве целей.....	83
4.2.5 Планирование мероприятий по реализации проекта. План-график Ганта.....	84
4.4.6 Срок окупаемости вложений.....	85
Выводы по разделу 4.....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	89
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	90
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение А Статья в сборнике «Наука ЮУрГУ: Материалы 69-й научной конференции. Секции технических наук. 2016 г.».....	95
Приложение Б Компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В.....	102
Приложение В Физическая модель электрической сети напряжением 380 В.....	112
Приложение Г Опытная электрическая сеть напряжением 380 В.....	117

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Наиболее частым повреждением в электрических сетях напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью являются обрывы фазных и нулевого проводов. Это не только приводит к нарушению электроснабжения потребителей, но и создает электро- и пожароопасные ситуации.

Анализ статистических данных по числу и длительности аварийных отключений линий 0,38 кВ показывает, что самыми распространенными повреждениями в этих сетях являются обрывы проводов, короткие замыкания и замыкания на землю. Стоит отметить, что в связи с большим количеством повреждений в таких сетях, происходит наибольшее количество электропоражений со смертельным исходом (до 60 % от общего числа).

В технической литературе (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 380 В (ВЛ-380 В) 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.

Поэтому исследование режимных параметров, их анализ, разработка и внедрение системы защиты, которая позволит своевременно выявлять обрывы фазных и нулевого проводов и отключать линии, где они произошли, является актуальной научно-технической задачей.

**Цель работы** – исследование режимных параметров в начале воздушной линии, их анализ и разработка предложений по созданию системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие задачи исследования:

1 Провести теоретические и экспериментальные исследования напряжений, возникающих в электрической сети при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В на компьютерной модели в программной среде Matlab, на физической модели и опытной электрической сети.

2 Обосновать критерии выявления обрывов фазных и нулевого проводов указанных линий.

3 Разработать алгоритм работы системы защиты в случае обрывов фазных и нулевого проводов, которая основывается на измерении режимных параметров воздушных линий напряжением 380 В.

**Объект исследования** – воздушные линии электропередачи напряжением 380 В при возникновении в них обрывов фазных и нулевого проводов.

**Предмет исследования** – получение закономерных результатов в изменении напряжений сети при возникновении обрывов фазных и нулевого проводов, которые позволят разработать защиту от указанных режимов.

***Научная новизна основных положений и результатов:***

1 Для определения параметров системы защиты проведены исследования изменений напряжений и токов при различных режимах работы электрической сети с использованием компьютерного и физического моделирования. Результаты подтверждены экспериментами в опытной электрической сети.

2 Разработаны критерии выявления различных режимов работы воздушной линии напряжением 380 В. Найден алгоритм изменения токов, возникающих при обрыве фазных и нулевого проводов в воздушных линиях электрических сетей напряжением 380 В, а также определена логика выявления этих обрывов.

3 Предложены дополнительные функции для микропроцессорного счетчика электрической энергии с целью его использования в качестве системы защиты при обрывах проводов воздушной линии напряжением 380 В.

***Практическая значимость работы:***

1 Применение разработанной системы защиты при эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В существенно повышает уровень электробезопасности.

2 Применение данной системы защиты существенно экономит затраты на осуществление электробезопасности и предотвращения электротравматизма, ускорит процесс выявления места обрыва проводов.

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 380 В

Электроснабжение городских посёлков с малоэтажной застройкой и 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 схемами соединения обмоток «треугольник – звезда с нулём», «звезда – звезда с нулем» или «звезда – зигзаг с нулём». Воздушные линии напряжением 380 выполняются, чаще всего, четырехпроводными с многократным заземлением нулевых проводов линий (с повторными заземлителями). Так же электрические сети питают большое число однофазных электроприемников. В ходе чего возникает несимметрия токов по фазам ВЛ–380 В, а в связи с этим возникает и ток в нулевом проводе, достигающий значения до 50% от рабочего фазного тока, а иногда и более. Через повторные заземления ток нулевого провода отсасывается в нулевые провода соседних линий и в заземляющее устройство питающей ТП, соединённое с нейтралью силового трансформатора.

В общем случае, большая часть ВЛ–380 В, выполняемая с помощью неизолированных проводов, представляет собой систему с совмещенным нулевым рабочим и нулевым защитным проводниками, т.е. систему TN-C [41]. Возможен так же перевод электрической сети системы TN-C в пятипроводную, т.е. систему TN-S. Но данное мероприятие является очень затратным и затяжным в связи с тем, что общая протяженность таких сетей достаточно велика. Перевод электрических сетей с системы TN-C в систему TT с изолированной нейтралью также приводит к повышенным затратам на сеть, т.к. требуется выполнение индивидуальных или групповых заземлителей.

На долю воздушных линий электропередачи напряжением 380 В, выполненных неизолированными проводами, приходится 40–43 % всех повреждений электрических сетей этого класса напряжения. Анализ полученных и рассмотренных 7784 отказов в МУП «Рязанские городские распределительные сети» за период 1995–2005 гг. показал, что основными причинами повреждения ВЛ–380 В являются: окисление проводов 18 %; обрыв вводов 6 %; повреждения опор 3 %; обрыв проводов 62 %, схлест проводов 11 % [27].

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 [20]. Примерно 7–13% от всего числа травм и несчастных случаев, связанных с леталь-

ным 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.

В случае короткого замыкания «фаза – земля» электропоражение происходит из-за случайного прикосновения к оборванным, лежащим на земле и находящимся под напряжением проводам линий электропередачи.

Поскольку режим «фаза – земля» может продолжаться неопределенно долго, 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.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что разработка устройств релейной защиты, противоаварийной автоматики от аварийных и ненормальных режимов в сетях напряжением 0,38 кВ представляет собой актуальную задачу, направленную на повышение надежности электроснабжения и электробезопасности в городских посёлках и сельских районах.

## 1.2 Режимы работы электрических сетей с глухо заземленной нейтралью

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 работы самой электрической сети;
- различные сочетания обрывов фазных и нулевого проводов ВЛ;
- различные сочетания замыканий фазных проводов с нулевым проводом ВЛ, а также замыканий этих проводов на землю;
- различные короткие замыкания в параллельных воздушных линиях, питающихся от одной трансформаторной подстанции;
- симметричные повышения или понижения напряжений питающей сети вследствие возникающих в ней каких-либо возмущений – регулирование напряжения и т.д.

На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема простейшей трёхфазной четырёхпроводной электрической сети, состоящей из трёхфазного трансформатора Т, подключенного к электрической сети напряжением 6–10 кВ, четырёхпроводной воздушной линии и нагрузки потребителей электрической энергии в конце линии. На вводе потребителя включен микропроцессорный трёхфазный счётчик электроэнергии.

На рисунке 1.1 обозначено:

1 и 2 – пунктирные линии (сечения), обозначающие место возникновения различных видов повреждений ВЛ. Эти две линии разделяют ВЛ на два участка – до и после места повреждения линии (со стороны источника питания и со стороны потребителя);

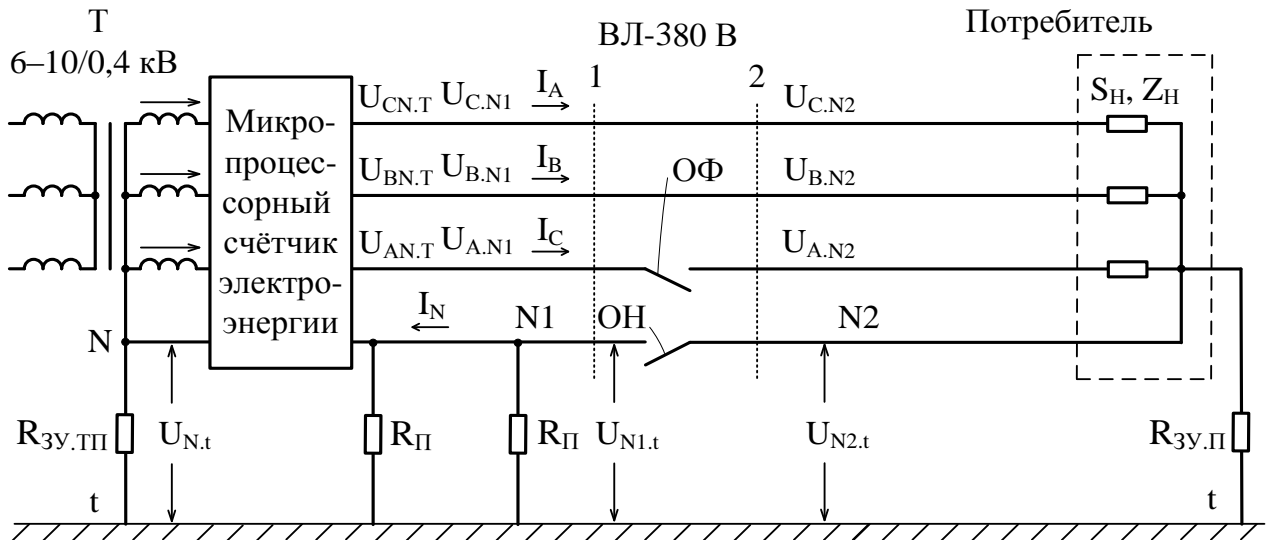


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В:

$R_{ЗУ.ТП}$ ,  $R_{ЗУ.П}$  – сопротивления заземляющих устройств трансформаторной подстанции и потребителя электрической энергии;  $R_{П}$  – сопротивление повторных заземлителей ВЛ–380 В;  $S_H$ ,  $Z_H$  – мощность и сопротивление нагрузки потребителя; АВ – однофазные автоматические выключатели, обеспечивающие коммутацию и защиту потребителя электрической энергии; А, В, С и N – обозначение соответственно фазных и нулевого проводов ВЛ;  $t$  – потенциал земли; 1 и 2 – пунктирные линии (сечения), обозначающие место возникновения различных видов повреждений ВЛ, эти две линии разделяют ВЛ на два участка – до и после места повреждения линии (со стороны источника питания и со стороны потребителя)

$U_{AN.T}$ ,  $U_{BN.T}$ ,  $U_{CN.T}$  – фазные напряжения относительно нулевого провода на выводах силового трансформатора Т;

$U_{A.N1}$ ,  $U_{B.N1}$ ,  $U_{C.N1}$  и  $U_{A.N2}$ ,  $U_{B.N2}$ ,  $U_{C.N2}$  – напряжения фазных проводов относительно нулевого провода соответственно до и после места повреждения. Напряжения после места повреждения примем равными напряжениям на вводе потребителя – на вводных зажимах микропроцессорного счётчика электрической энергии;

$U_{N.t}$  – напряжение между нулевым проводом N и землёй  $t$ ;

ОФ и ОН –  $U_{N.t}$  обозначение соответственно обрывов фазного и нулевого проводов.

С целью упрощения записей введём следующие обозначения: НР – нормальный режим; ОФ – обрыв фазного провода; ОН – обрыв нулевого провода;  $var$  и  $const$  – состояния фазных нагрузок потребителя  $S_{H.A}$ ,  $S_{H.B}$ ,  $S_{H.C}$ .

Составим перечень возможных режимов работы электрической сети напряжением 380 В с четырёхпроводной воздушной линией, питающей потребителей электрической энергии [37, 54]. Режимы работы определяются:

1 Состоянием воздушной линии. Она может находиться в нормальном режиме работы, в линии могут происходить обрывы фазного и нулевых проводов с их падением на землю и без них.

2 Характером изменения электрической нагрузки потребителей – пофазное изменение нагрузки.

3 Состоянием фазных автоматических выключателей, устанавливаемых на вводе потребителя. Состояние выключателей влияет на несимметрию нагрузок потребителя.

4 Сопротивлениями заземляющих устройств потребителя и трансформаторной подстанции, сопротивлением повторных заземлений нулевого провода воздушной линии.

5 Различного рода повреждениями, возникающими в параллельных воздушных линиях, питающихся от одного трансформатора, – главным образом различного вида короткими замыканиями.

Указанные режимы работы тем или иным образом влияют на напряжения и токи (параметры) этой электрической сети.

На рисунке 1.2 показано графическое представление возможных режимов работы электрической сети напряжением 380 В, а в таблице 1.1 – их табличное обозначение.

В таблице 1.1 приведён перечень эксплуатационных режимов, охваченных исследованиями и их характерные особенности. С целью обеспечения удобства чтения и восприятия информации заполнение таблице 1 выполнено с малой плотностью. Отсутствие данных в ячейках, несущих информацию о состоянии проводов ВЛ и автоматических выключателей, установленных в щитках потребителей, свидетельствуют об отсутствии обрывов проводов и рабочем (включенном) состоянии указанных автоматических выключателей.

Рассмотрим различные режимы работы электрической сети:

1 Нормальный режим работы электрической сети, при котором трансформаторная подстанция и воздушная линия находятся в рабочем состоянии.

Режим 1. Нагрузка потребителя изменяется симметрично во всех трёх фазах в диапазоне от максимальной рабочей нагрузки  $S_{\text{НАГР}}$  (активно-индуктивной или чисто активной  $P_{\text{НАГР}}$ ), принимаемой за 100 %, до 0 %.

Режимы 2 и 3. Нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $S_{\text{НАГР}}$  при неизменной нагрузке на других фазах, равной 100 %. Несимметричное изменение нагрузки по фазам приводит к искажению линейных и фазных напряжений электрической сети, а также к появлению напряжения несимметрии УНС системы трёх фазных напряжений относительно нулевого провода ВЛ–380 В.

2 Обрыв фазного провода воздушной линии.

Режимы 4 и 5. При обрыве одного фазного провода нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $S_{\text{НАГР}}$ .

3 Обрыв нулевого провода.

Режимы 6 и 7. При обрыве нулевого провода нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $S_{\text{НАГР}}$ .

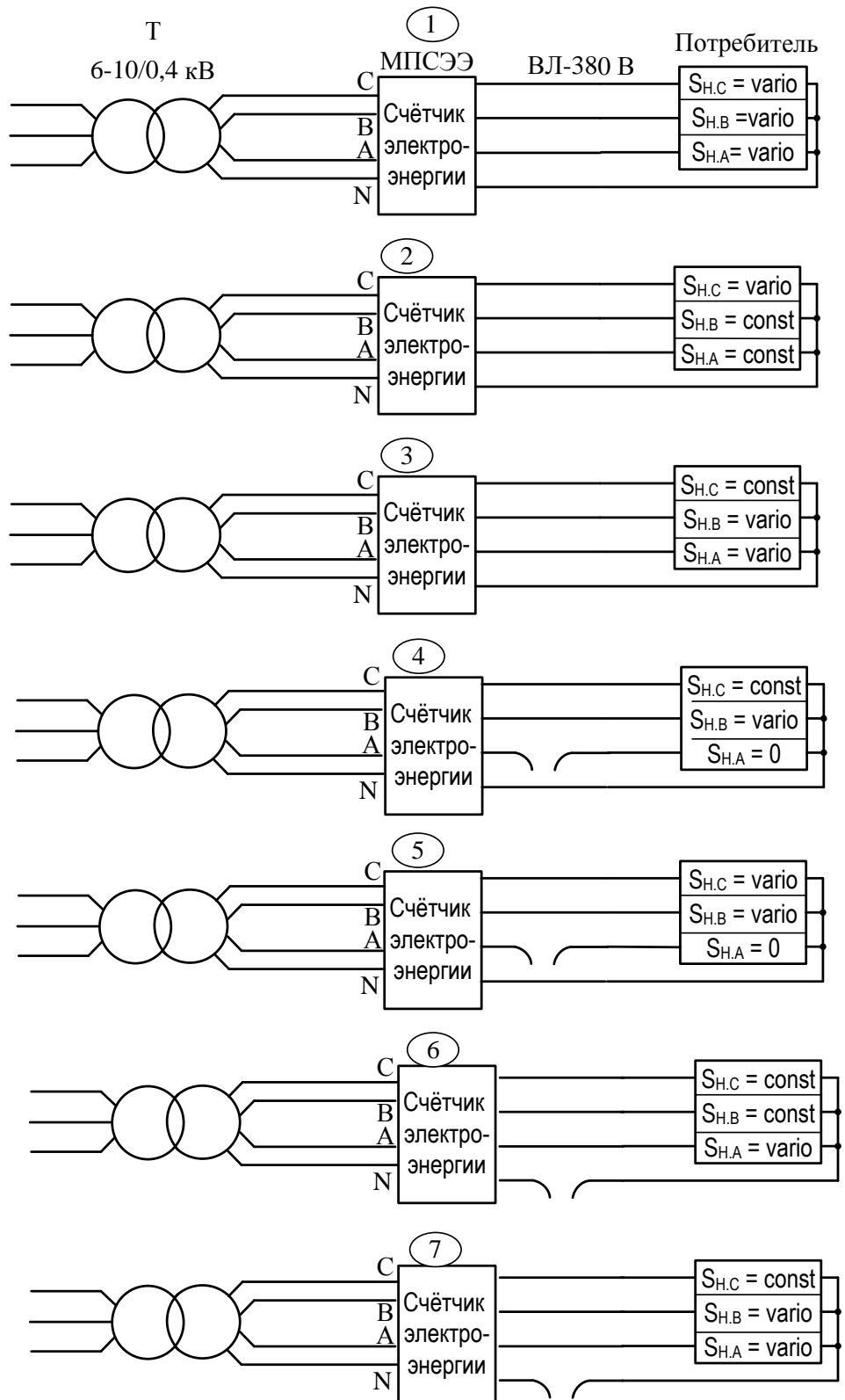


Рисунок 1.2 – Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В

Таблица 1.1 – Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В с четырёхпроводной воздушной линией и режимы изменения электрической нагрузки потребителя

Номер режима, схемы		Состояние фазных проводов			Состояние нулевого провода	Состояние АВ, установленных в фазах потребителя			Режимы изменения нагрузки потребителя $S_n$		
		A	B	C		A	B	C	A	B	C
1. Нормальный режим работы воздушной линии ВЛ–380 В (НР ВЛ)											
1	НР ВЛ, симметричная нагрузка по фазам								const	const	const
2	НР ВЛ, изменение нагрузки в одной фазе								const	const	vario
3	НР ВЛ, изменение нагрузки в двух фазах								const	vario	vario
2. Обрыв фазного проводов ВЛ–380 В (ОФ)											
4	ОФ в одной фазе, изменение нагрузки в одной фазе	ОФ							0	vario	const
5	ОФ в одной фазе, изменение нагрузки в двух фазах	ОФ							0	vario	vario
3. Обрыв нулевого провода ВЛ–380 В (ОН)											
6	ОН, изменение нагрузки в одной фазе				ОН				vario	const	const
7	ОН, изменение нагрузки в двух фазах				ОН				const	vario	vario

### 1.3 Распределение токов электрической сети напряжением 380 В

Сначала рассмотрим распределение токов в четырехпроводной электрической сети с глухо заземлённой нейтралью напряжением 380 В при нормальном режиме работы. На рисунке 1.3 обозначено:  $U_{A,Ф}$ ,  $U_{B,Ф}$ ,  $U_{C,Ф}$  – фазные напряжения источника питания;  $Z_{Л}$  – фазные сопротивления ВЛ;  $Z_{H,A}$ ,  $Z_{H,B}$ ,  $Z_{H,C}$  – сопротивления электрической нагрузки потребителя;  $Z_{НП,1}$ ,  $Z_{НП,2}$ ,  $Z_{НП,3}$  – сопротивления нулевого провода ВЛ, разделённые сопротивлениями повторных заземлителей  $R_{П,1}$ ,  $R_{П,2}$ ,  $R_{П,3}$  нулевого провода ВЛ;  $R_{ЗУ,ТП}$ ,  $R_{ЗУ,П}$  – сопротивления заземляющих устройств ТП и потребителя;  $I_{A,Ф}$ ,  $I_{B,Ф}$ ,  $I_{C,Ф}$  – токи, протекающие по фазным проводам ВЛ;  $I_{НП}$ ,  $I_{НП1}$ ,  $I_{НП2}$ ,  $I_{НП3}$  – токи, протекающие на разных участках нулевого провода;  $I_{ЗУ,ТП}$ ,  $I_{ЗУ,П}$ ,  $I_{П,1}$ ,  $I_{П,2}$ ,  $I_{П,3}$  – токи, протекающие по сопротивлениям заземления ТП, потребителя и повторным заземлителям ВЛ.

Векторная сумма трёх фазных токов воздушной линии

$$\underline{I}_{\Delta 1} = \underline{I}_{A,Ф} + \underline{I}_{B,Ф} + \underline{I}_{C,Ф} = \underline{I}_{НП} = 3 \cdot \underline{I}_0 \quad (1.1)$$

представляет дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$ , который при отсутствии сопротивлений повторных заземлителей  $R_{П}$  и сопротивления заземляющего устройства  $R_{ЗУ,П}$  у потребителя равен току  $I_{НП}$ , протекающему по нулевому проводу, и току  $I_{\Delta 3}$ , протекающему на участке схемы между нулевым проводом и нейтралью трансформатора. Кроме того, при указанных условиях дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  представляет утроенный ток нулевой последовательности  $3 \cdot I_0$ , возникающий в трёхфазной системе относительно нулевого провода.

Векторная сумма четырёх токов воздушной линии

$$\underline{I}_{\Delta 2} = \underline{I}_{A,Ф} + \underline{I}_{B,Ф} + \underline{I}_{C,Ф} + \underline{I}_{НП} \quad (1.2)$$

представляет дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$ , который при отсутствии сопротивлений повторных заземлителей  $R_{П}$  и сопротивления заземляющего устройства  $R_{ЗУ,П}$  у потребителя, равен току  $I_{\Delta 4}$ , протекающему на участке схемы между заземляющим устройством ТП и точкой соединения нулевого провода с нейтралью трансформатора. При указанных условиях токи  $I_{\Delta 2}$  и  $I_{\Delta 4}$  равны нулю. В общем случае, ток  $I_{\Delta 2}$  становится отличным от нуля, во-первых, при стекании токов с нулевого провода на землю через повторные заземлители ВЛ и заземляющие устройства потребителей, во-вторых, при возникновении каких-либо утечек изоляции с фаз на землю, например, при пробое или загрязнении изоляторов ВЛ, в-третьих, при возникновении однофазного замыкания на землю, например, при обрыве и падении на землю фазного провода.

При симметричной нагрузке воздушной линии дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  и ток в нулевом проводе  $I_{НП}$  равны нулю. Однако, сопротивления однофазных электрических нагрузок  $Z_{H,A}$ ,  $Z_{H,B}$ ,  $Z_{H,C}$ , питающихся от ВЛ, характеризуются значитель-

ным неравенством, которое обуславливает значительные значения тока  $I_{НП}$ , протекающего по нулевому проводу и достигающего половины максимального тока  $I_{Р.МАКС}$  нагрузки ВЛ.

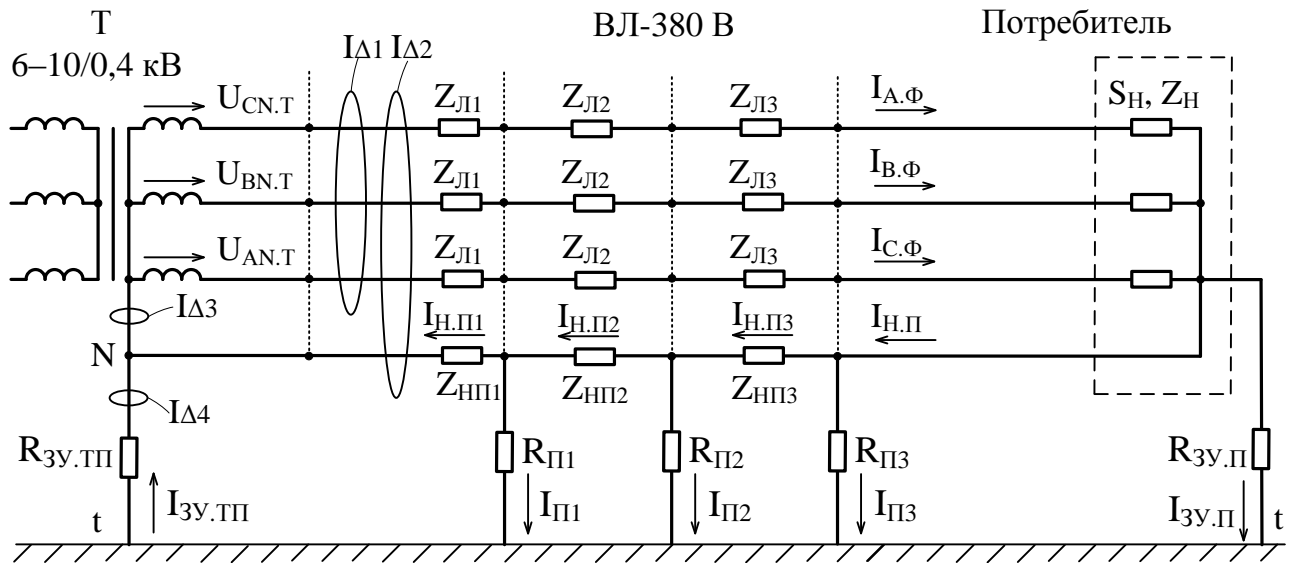


Рисунок 1.3 – Распределение токов в электрической сети при нормальном режиме работы

Наличие повторных заземлителей  $R_{Пi}$  и заземляющего устройства  $R_{ЗУ.П}$  у потребителя и имеющейся несимметрии нагрузок ВЛ обуславливает стекание с нулевого провода ВЛ соответствующих токов, которые создают дополнительный небаланс для трёхфазной четырёхпроводной воздушной линии. От этих двух видов небаланса должны быть отстроены защиты, в которых в качестве исходной информации могут быть использованы дифференциальные токи  $I_{\Delta 1}$  или  $I_{\Delta 2}$ .

Отметим, из анализа распределения токов видно, что при обрыве фазного провода, ток в оборванном проводе фазы исчезает. (рисунок 1.4). Токи в здоровых фазах примерно равны друг другу, но появляется ток в нулевом проводе. Незначительная часть тока проходит через сопротивления повторных заземлителей нулевого провода и возвращается к источнику через заземляющее устройство ТП, поскольку сопротивление нулевого провода  $Z_{НП}$  значительно меньше сопротивлений повторных заземлителей и заземляющего устройства ТП. Токи в фазном и нулевом проводах различаются незначительно.

При однофазном коротком замыкании на нулевой провод характер распределения токов в электрической сети существенно не меняется, т.к. сопротивление однофазного короткого замыкания  $Z_{П}$  между повреждённой фазой и нулевым проводом соответствует мощной однофазной нагрузке (рисунок 1.4). Следовательно, ток однофазного короткого замыкания  $I_{ОКЗ}$  появляется в токе повреждённой фазы, в дифференциальном токе ВЛ  $I_{\Delta 1}$ , токе нулевого провода  $I_{НП}$  и токе  $I_{\Delta 3}$ .

Ток металлического КЗ фазы на нулевой провод  $I_{ОКЗ}$  определяется сопротивлением петли «фаза-нуль» от ТП до места повреждения. Этот ток значительно снижается по мере удаления от ТП и при удалённых однофазных коротких замыканиях



(при длине ВЛ 700–1000 м и более) соизмерим или незначительно превышает ток нагрузки.

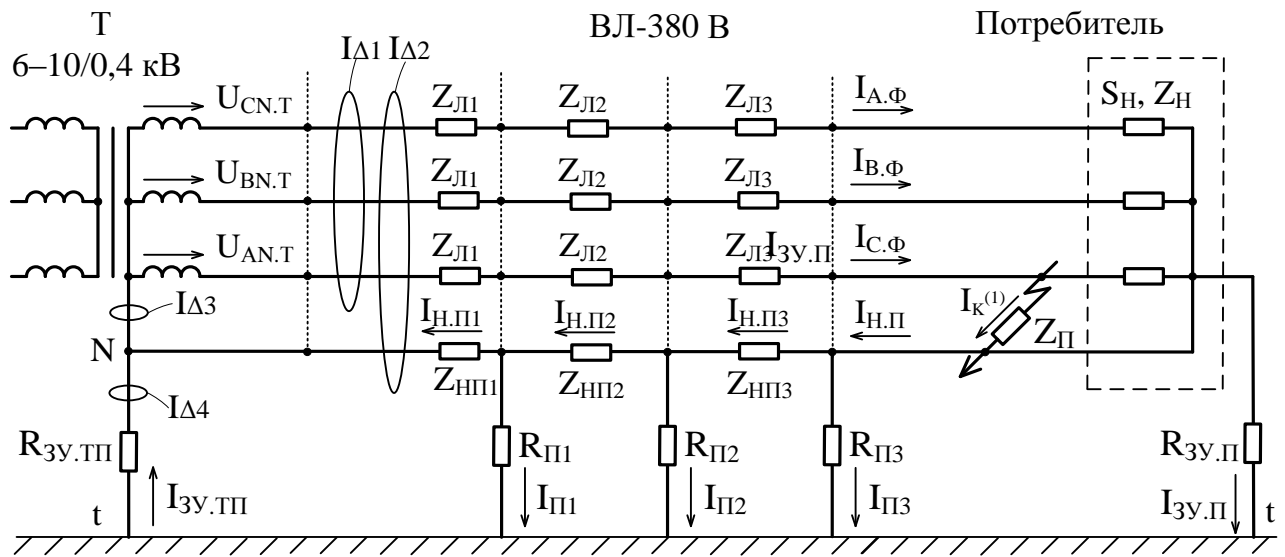


Рисунок 1.4 – Распределение токов в электрической сети при замыкании фазы на нулевой провод

Отметим, из анализа распределения токов видно, что при однофазном замыкании фазы на нулевой провод значительная часть тока проходит по цепи трансформатор (источник питания) – фазный провод – нулевой провод – трансформатор. Только незначительная часть тока проходит через сопротивления повторных заземлителей нулевого провода и возвращается к источнику через заземляющее устройство ТП, поскольку сопротивление нулевого провода  $Z_{НП}$  значительно меньше сопротивлений повторных заземлителей и заземляющего устройства ТП. Токи в фазном и нулевом проводах различаются незначительно.

Такой вид повреждения можно выявить с помощью фильтра токов нулевой последовательности, охватывающего фазные провода линии и выделяющего ток  $I_{\Delta 1}$ , или с помощью максимальной токовой защиты, использующей информацию о токе  $I_{\Delta 2}$ , охватывающего фазные и нулевые провода. Но эти защиты должны быть отстроены от тока несимметрии фазных нагрузок и плюсов токов, стекающих с нулевого провода на землю через заземляющие устройства и повторные заземлители.

При возникновении обрыва и замыкания фазного провода линии на землю (рисунок 1.5) распределение токов в электрической сети существенно изменяется. При обрыве фазного провода ток нагрузки поврежденной фазы становится равным нулю. В тоже время при падении провода на землю появляется ток однофазного замыкания на землю  $I_{ОЗЗ}$ , величина которого определяется сопротивлением фазного провода плюс сопротивление между фазой и землей  $Z_{ОЗЗ}$ . Отметим, что значение последнего сопротивления может изменяться от десятых долей Ома до сотен и тысяч Ом. Эти два изменения обуславливают изменение и дифференциального тока ВЛ  $I_{\Delta 1}$ .

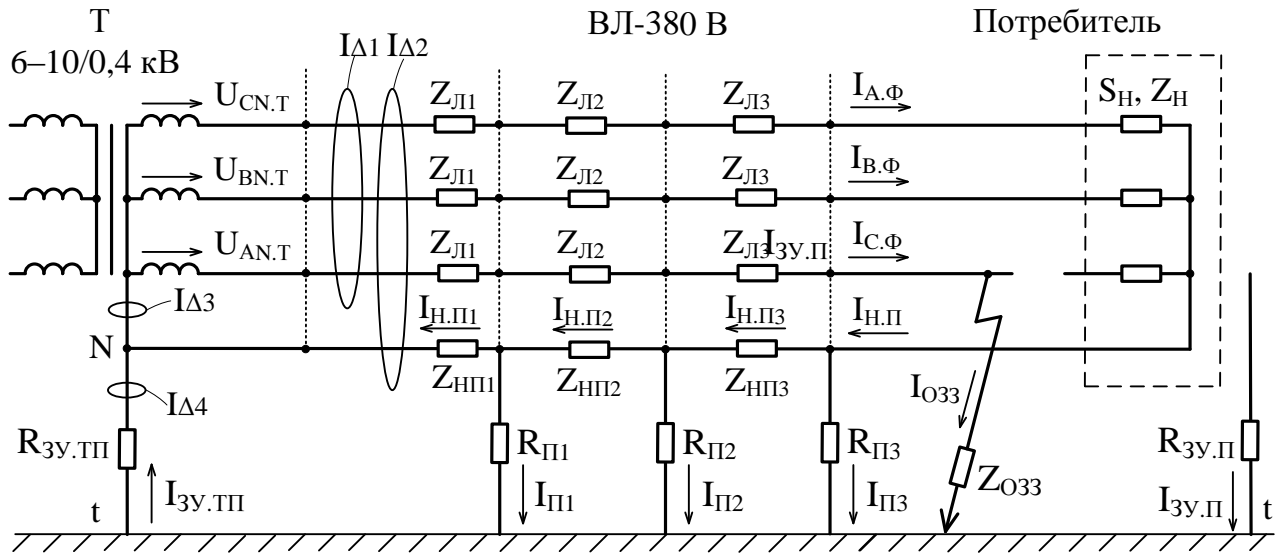


Рисунок 1.5 – Распределение токов в электрической сети при обрыве и замыкании фазного провода

Третье изменение распределения токов связано с исчезновением фазного тока нагрузки поврежденной фазы в токе  $I_{Н.П}$ , протекающем по нулевому проводу. В тоже время ток однофазного замыкания на землю  $I_{ОЗЗ}$  минует нулевой провод. Вследствие протекания тока  $I_{ОЗЗ}$  по земле и возвращении его через сопротивление заземляющего устройства ТП  $R_{ЗУ.ТП}$  увеличится соответствующий ток  $I_{ЗУ.ТП}$ . Ток  $I_{ОЗЗ}$ , если убрать сопротивление заземляющего устройства потребителя  $R_{ЗУ.П}$  и сопротивления повторных заземлителей  $R_{Пi}$ , можно получить как разницу между дифференциальным током ВЛ  $I_{\Delta 1}$  и током, протекающим по нулевому проводу  $I_{Н.П}$

$$I_{ОЗЗ} = I_{\Delta 1} + I_{Н.П} = I_{\Delta 2} = I_{\Delta 4}. \quad (1.3)$$

Кроме того, при указанных условиях ток  $I_{ОЗЗ}$  равен токам  $I_{\Delta 2}$  и  $I_{\Delta 4}$ .

Однако, токи, протекающие по сопротивлениям  $R_{Пi}$  и  $R_{ЗУ.П}$ , искажают информацию о токе однофазного замыкания на землю  $I_{ОЗЗ}$ .

Примечание. Поскольку схема представлена одной воздушной линией, то влияние повторных заземлителей других ВЛ можно учесть в сопротивлении  $R_{ЗУ.ТП}$ , которое рассматривается как эквивалентное сопротивление нейтрали трансформатора ТП и сопротивлений повторных заземлений других ВЛ.

#### 1.4 Актуальность защиты ВЛ–380 В при обрывах фазных и нулевого проводов

Воздушная линия электропередачи – устройство, предназначенное для передачи или распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом воздухе и прикрепленным с помощью траверс (кронштейнов), изоляторов и арматуры к опорам или другим сооружениям (мостам, путепроводам).

Воздушные линии напряжением 380 В (ВЛ–380 В) выполняются, как правило, воздушными, четырехпроводными с многократным заземлением нулевых проводов линий (с повторными заземлителями). Наряду с трехфазными потребителями, электрические 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, а иногда и более. Через повторные заземления ток нулевого провода отсасывается в нулевые провода соседних линий и в заземляющее устройство питающей ТП, соединённое с нейтралью силового трансформатора.

Наименее надежным звеном в системе электроснабжения городских посёлков и сельскохозяйственных потребителей являются ВЛ–380 В. Анализ аварийной статистики по данным Союзтехэнерго и других источников информации показывает, что на 100 км электрических сетей напряжением 380 В приходится около 40–50 повреждений в год, причём около 62 % из них опасны для людей и животных [20]. Наряду с междуфазными короткими замыканиями в сетях могут быть однофазные замыкания вида «фаза – нуль» и «фаза – земля», а также обрывы фазных и нулевых проводов линий. Указанные повреждения являются опасными с точки зрения электробезопасности и могут также привести к перерывам электроснабжения потребителей и к выходу из строя бытовых электроприемников.

На 01.01.2013 г. общая протяженность ВЛ–380 В, состоящих на балансе филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго», составляет 12629 км, из них только 249 км выполнены самонесущими изолированными проводами. Следует отметить, что практически все ВЛ–380 В, выполненные неизолированными проводами, представляют собой электрическую сеть с совмещенным нулевым рабочим и нулевым защитным проводниками, т.е. систему TN-C. Перевод электрической сети системы TN-C в пятипроводную, т.е. систему TN-S является достаточно дорогим и затратным мероприятием, т.к. общая протяжённость таких сетей достаточно большая. Перевод электрических сетей с системы TN-C в систему TT с изолированной нейтралью также приводит к повышенным затратам на сеть, т.к. требуется выполнение индивидуальных или групповых заземлителей

Самой распространенной мерой защиты ВЛ–380 В от коротких замыканий, применяемой в настоящее время в электрических сетях, является установка плавких предохранителей или автоматических выключателей на распределительном щите 0,4 кВ трансформаторной подстанции. Указанные защиты работают не всегда удовлетворительно, из-за малых кратностей токов короткого замыкания, температурной нестабильности характеристик тепловых расцепителей, низкого уровня эксплуатации и т.п. Если же происходят обрывы фазных или нулевых проводов с их падением на землю, то автоматические выключатели и плавкие предохранители совсем не почувствуют этот вид повреждения.

Устройства для защиты линий при однофазных коротких замыканиях вида «фаза – земля», а также при обрыве проводов, неполнофазных режимах практически в сельских сетях не применяются. Объясняется это тем, что выполнение некоторых защит встречает принципиальные затруднения в связи со спецификой сетей, а применение других не всегда оправдано.

Так, выполнение защиты от однофазных коротких замыканий «фаза – земля» вызывает затруднения вследствие:

- малой величины тока замыкания, определяемой в основном сопротивлением растеканию в месте повреждения;
- наличия отсосов тока короткого замыкания в неповрежденные линии через повторные заземления нулевых проводов и заземляющие контура производственных потребителей;
- наличия в нулевых проводах линий токов, обусловленных случайной несимметрией подключенных нагрузок. Часть этих токов также попадает (отсасывается) в нулевые провода соседних линий и в цепь заземления нейтрали трансформатора;
- появления в нулевых проводах линий блуждающих токов, источниками которых являются электрифицированные железные дороги, поврежденные высоковольтные линии и т. п.

В совокупности эти факторы затрудняют одновременное обеспечение условия чувствительности и селективности указанных выше защит.

### 1.5 Задачи исследований

Для достижения заявленной цели необходимо:

1 Провести теоретические и экспериментальные исследования напряжений, возникающих в электрической сети при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В на компьютерной модели в программной среде Matlab, на физической модели и в опытной электрической сети.

2 Обосновать критерии выявления обрывов фазных и нулевого проводов указанных линий.

3 Разработать алгоритм работы системы защиты в случае обрывов фазных и нулевого проводов, которая основывается на измерении режимных параметров воздушных линий напряжением 380 В.

4 Оценить повышение уровня электробезопасности в результате её внедрения в практику эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В.

### Выводы по разделу 1

В данной разделе работы была описана электрическая сеть напряжением 380 В, рассмотрены различные режимы работы электрической сети напряжением 380 В. Описано распределение токов в электрической сети, а так же сформированы положения, подтверждающие актуальность разработки защиты в электрической сети напряжением 380 В. Сформулированы задачи исследования.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,38 кВ

### 2.1 Режимные параметры электрической сети

При возникновении продольной и поперечной несимметрии электрической сети, например, при обрывах нулевого и фазных проводов воздушной линии электропередачи, а также при однофазных коротких замыканиях меняются напряжения фаз относительно нулевого провода, перераспределяются токи в электрической сети и одновременно появляются симметричные составляющие напряжений и токов обратной и нулевой последовательности [23, 37, 54]. Информация об указанных изменениях может быть использована при построении защит электрической сети от возникающих несимметричных режимов работы.

Для построения защиты ВЛ-380 В используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжения и напряжений фаз относительно земли; изменения обратной и нулевой составляющих в напряжениях и токах электрической сети, наложение токов не промышленной частоты и др.

Для выявления режимов работы ВЛ-380 В используют следующие основные виды функциональных блоков: фильтры напряжений и токов обратной и нулевой последовательности; дифференциальные трансформаторы тока; частотные фильтры; блоки сравнения; логические схемы анализа режима.

Защиты от обрывов проводов в сетях напряжением 380 В могут быть установлены в начале и в конце линии.

Целью данной работы является исследование режимных параметров в начале воздушной линии, где будет устанавливаться предполагаемая защита.

### 2.2 Результаты исследований на компьютерной модели

Описание компьютерной модели и измерений, проведенных на ней, представлены в приложении Б.

При исследованиях фиксировались:

- величины фазных напряжений относительно нулевого провода в начале и конце ВЛ и значения углов между векторами соответствующих напряжений и вещественной осью;

- величины фазных и нулевого токов в начале ВЛ и значения углов между векторами соответствующих токов и вещественной осью;

- величины напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в начале ВЛ и значения углов между векторами соответствующих напряжений и токов и вещественной осью;

- величины дифференциальных  $I_{\Delta 1}$  (сумма трёх фазных токов) и  $I_{\Delta 2}$  (сумма трёх фазных и нулевого токов);

- величины токов, протекающих через повторные заземления ВЛ и заземляющее устройство потребителя.

По результатам замеров рассчитаны:

– относительные значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей в начале ВЛ – отнесены к среднему фазному напряжению сети при симметричной нагрузке  $U_{\phi} = 231 \text{ В}$ ;

– относительные значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей и дифференциальных токов в начале ВЛ – отнесены к среднему фазному току  $127 \text{ А}$ .

Результаты измерений параметров электрической сети в нормальном режиме представлены в таблицах 2.1–2.2.

В таблицах 2.3 и 2.4 представлены результаты измерений параметров электрической сети при обрыве фазы А

Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве нулевого провода представлены в таблицах 2.5 – 2.6.

### 2.3 Результаты исследований на физической модели

Физическая модель, равно как и способы исследований вынесены в приложение В.

При исследованиях фиксировались в начале (точка 3) и конце (точка 4) ВЛ:

– фазные и линейные напряжения, напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей;

– фазные токи нагрузки и ток в нулевом проводе;

– токи обратной и нулевой последовательностей.

Результаты исследований, с учетом обмоток трансформаторов и разных точек подключения прибора РЕСУРС, представлены в таблицах 2.7–2.12.

### 2.4 Результаты исследований в опытной электрической сети

Описание опытной электрической сети на полигоне Красноармейского РЭС, равно как и программа испытаний вынесены в приложение Г.

Результаты получены по выборкам из данных исследований, проведенных кафедрой СЭС в 2014 г., когда измерения в опытной сети проводились как для начала, так и конца ВЛ. Но данные о режимных параметрах в начале ВЛ ранее не анализировались.

Результаты исследования режимов работы опытной электрической сети напряжением  $380 \text{ В}$  представлены в таблицах 2.13–2.17.

Таблица 2.1 – Результаты измерений параметров электрической сети в нормальном режиме,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$ 

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Параметры электрической сети																					
	А	В	С	$U_{AN}$ ,	$U_{BN}$ ,	$U_{CN}$ ,	$U_1$ ,	$U_2$ ,	$U_{2*}$ ,	$U_0$ ,	$U_{0*}$ ,	$U_{НС}$ ,	$U_{A2.N}$ ,	$U_{B2.N}$ ,	$U_{C2.N}$ ,	$I_A$ ,	$I_B$ ,	$I_C$ ,	$I_N$ ,	$I_1$ ,	$I_2$ ,	$I_{2*}$ ,	$I_0$ ,	$I_{0*}$ ,	
				В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	о.е.	В/град	о.е.	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	о.е.
1	100	100	100	231,3	231,3	231,3	231,3	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	210,3	210,3	210,3	121,7	121,7	121,7	0,0	121,7	0,0	0,000	0,0	0,000	
				-1,7	-121,7	-118,3	-1,7	0,0		0,0		0,0		0,0	-3,6	-123,6	116,4	-3,6	-123,6	116,4	0,0	-3,6	0,0		0,0
2	100	100	80	229,5	232,6	232,2	231,4	0,3	0,001	2,2	0,010	6,7	206,9	210,0	218,5	119,7	121,5	101,1	16,6	114,1	7,6	0,062	5,6	0,046	
				-1,8	-122,0	119,0	-1,6	-56,9		-168,8		-168,8	-3,0	-124,7	17,4	-2,9	-124,7	117,4	-77,2	-3,4	54,2		-77,0		
3	100	100	60	227,5	234,1	233,2	231,6	0,7	0,003	4,6	0,020	13,9	203,2	209,9	227,2	117,5	121,4	78,8	34,5	105,9	15,7	0,129	11,6	0,095	
				-2,0	-122,4	119,7	-1,5	-55,0		-167,6		-167,6	-2,2	-126,0	118,6	-2,2	-126,0	118,6	-76,0	-3,5	5,4		-75,9		
4	100	100	40	225,4	235,8	234,2	231,7	1,1	0,005	7,2	0,031	21,6	199,1	210,1	236,6	115,2	121,5	54,7	53,9	97,0	24,7	0,203	18,1	0,148	
				-2,1	-122,0	120,5	-1,4	-54,6		-166,4		-166,4	-1,5	-127,3	119,8	-1,5	-127,3	119,8	-74,8	-3,6	56,6		-74,7		
5	100	100	20	223,2	237,6	235,1	231,8	1,6	0,007	10,0	0,043	30,1	194,5	210,7	246,6	112,5	121,9	28,5	74,8	87,4	34,3	0,282	25,1	0,206	
				-2,4	-123,1	121,4	-1,3	-53,2		-165,1		-165,1	-0,7	-128,7	121,1	-0,7	-128,7	121,1	-73,5	-4,2	57,9		73,4		
6	100	100	1	221,0	239,7	235,9	232,0	2,0	0,009	12,9	0,056	38,8	189,7	211,7	256,8	109,8	122,3	1,5	96,5	77,6	44,2	0,363	32,3	0,266	
				-2,6	-123,4	122,3	-1,2	-51,8		-163,7		-163,0	0,0	-130,0	122,5	0,0	-130,0	122,5	-72,1	-5,3	59,0		-72,0		
7	100	100	0,1	220,9	239,8	236,0	232,0	2,0	0,009	13,1	0,057	39,2	189,5	211,7	257,3	109,6	122,5	0,1	97,5	77,1	44,6	0,367	32,7	0,269	
				-2,7	-123,4	122,3	-1,2	-51,7		-163,6		-163,6	8,0	-130,0	122,6	0,1	-130,0	122,0	-72,0	-5,4	59,4		-71,9		
8	100	80	80	230,8	233,6	230,4	231,6	0,3	0,001	2,3	0,010	6,8	206,5	218,2	215,0	119,4	101,0	99,5	16,9	106,6	7,3	0,060	5,7	0,046	
				-2,2	-121,3	118,9	-1,5	-117,0		-108,0		-108,0	-4,1	-123,0	118,1	-4,1	-123,0	118,0	-16,7	-3,3	-6,7		-16,6		
9	100	60	60	230,4	236,1	229,2	231,9	0,7	0,003	4,8	0,021	14,4	202,3	227,0	219,7	117,1	78,8	76,3	35,8	90,7	14,6	0,120	12,0	0,099	
				-2,7	-120,9	119,5	-1,4	-117,0		-106,0		-106,5	-4,7	-123,7	120,0	-4,8	-123,7	120,0	-15,0	-3,1	-6,7		-14,9		
10	100	40	40	230,1	239,0	227,7	232,0	1,0	0,004	7,6	0,033	22,9	197,9	236,9	224,5	114,0	54,0	51,0	57,1	73,6	21,9	0,180	19,1	0,157	
				-3,3	-120,0	120,0	-1,2	-118,2		-104,0		-104,6	-5,6	-123,7	122,1	-5,6	-123,0	122,0	-13,0	-3,3	-7,0		-12,9		
11	100	20	20	230,0	242,1	225,7	223,4	1,3	0,006	10,8	0,047	32,6	193,2	248,1	229,1	111,8	28,7	26,5	81,1	55,5	29,2	0,240	27,2	0,223	
				-4,0	-119,9	120,8	-1,0	-118,0		-102,0		-102,4	-6,7	-123,6	124,4	-6,7	-123,0	124,4	-10,8	-4,4	-7,4		-10,7		
12	100	1	1	230,1	245,3	223,4	232,7	1,6	0,007	14,3	0,062	43,0	188,6	260,2	233,3	109,1	1,5	1,4	106,9	37,3	36,0	0,295	35,8	0,294	
				-4,7	-119,3	121,5	-0,8	-119,0		-100,0		-100,0	-8,1	-123,0	126,8	-8,1	-123,0	126,0	-8,4	-7,8	-8,2		-8,3		
13	100	0,1	0,1	230,2	245,5	223,3	223,7	1,7	0,007	14,5	0,063	43,5	188,3	2620,8	233,5	109,0	0,2	0,1	108,2	36,4	36,3	0,298	36,3	0,298	
				-4,7	-119,3	121,6	-0,8	-119,0		-99,0		-99,9	-8,2	-123,4	127,0	-8,1	-123,4	127,0	-8,3	-8,2	-8,2		-8,2		

$S_{Т.Н}=160 \text{ кВА}$ ; ВЛ-3×35+35;  $\cos\varphi_H=1$ ;  $R_{3.ПН}=4 \text{ Ом}$ ;  $R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$

Продолжение таблицы 2.1

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Параметры электрической сети						
	А	В	С	$I_{\Delta 1}$ ,	$I_{\Delta 1^*}$ ,	$I_{\Delta 2}$ ,	$I_{\Delta 2^*}$ ,	$I_{\Pi 1}$ ,	$I_{\Pi 2}$ ,	$I_{3У.П.}$ ,
				А/град	о.е.	А/град	о.е.	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
2	100	100	80	0,2	0,001	0,4	0,003	0,1	0,1	0,2
				-59,0		-63,5				
3	100	100	60	0,4	0,003	0,8	0,006	0,2	0,2	0,4
				-58,1		-62,9				
4	100	100	40	0,6	0,005	1,3	0,010	0,3	0,3	0,6
				-56,9		-62,0				
5	100	100	20	0,8	0,006	1,9	0,015	0,5	0,4	0,8
				55,5		-61,0				
6	100	100	1	1,0	0,008	2,6	0,022	0,6	0,5	1,0
				-54,0		-60,7				
7	100	100	0,1	1,0	0,008	2,7	0,022	0,6	0,6	1,0
				-54,0		-60,7				
8	100	80	80	0,2	0,001	0,4	0,003	0,1	0,1	0,2
				1,2		-3,6				
9	100	60	60	0,4	0,003	0,9	0,007	0,2	0,2	0,4
				2,9		-3,3				
10	100	40	40	0,6	0,005	1,7	0,014	0,3	0,3	0,6
				4,9		-2,9				
11	100	20	20	0,8	0,007	2,9	0,024	0,5	0,5	0,8
				7,1		-2,2				
12	100	1	1	1,1	0,009	5,0	0,041	0,6	0,6	1,1
				9,5		-0,9				
13	100	0,1	0,1	1,1	0,009	5,2	0,042	0,7	0,6	1,1
				9,6		-0,8				

 $S_{T.H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.П.П.}=4 \text{ Ом}; R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$



Таблица 2.2 – Результаты измерений параметров электрической сети в нормальном режиме,  $R_{3У.П} = \infty$  Ом

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Параметры электрической сети																				
	А	В	С	$U_{AN}$ ,	$U_{BN}$ ,	$U_{CN}$ ,	$U_1$ ,	$U_2$ ,	$U_{2*}$ ,	$U_0$ ,	$U_{0*}$ ,	$U_{НС}$ ,	$U_{A2.N}$ ,	$U_{B2.N}$ ,	$U_{C2.N}$ ,	$I_A$ ,	$I_B$ ,	$I_C$ ,	$I_N$ ,	$I_1$ ,	$I_2$ ,	$I_{2*}$ ,	$I_0$ ,	$I_{0*}$ ,
				В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	о.е.	В/град	о.е.	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	231,3	231,3	231,3	231,3	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	210,3	210,3	210,3	121,7	121,7	121,7	0,0	121,7	0,0	0,000	0,0	0,000
				-1,7	-121,0	118,0	-1,7	0,0		0,0		0,0		0,0	-3,6	-123,6	116,4	-3,6	-123,6	116,4	0,0	-3,6	0,0	
2	100	100	80	229,5	232,6	232,2	231,4	-168,0	-0,726	2,2	0,010	6,7	206,9	210,0	218,5	119,7	121,5	101,1	16,7	114,0	7,6	0,062	5,5	0,046
				-1,8	-122,0	119,0	-1,6	0,3		-168,8		-168,8		-2,9	-124,7	117,4	-2,9	-124,7	117,4	-77,1	-3,5	54,2		-77,1
3	100	100	60	227,5	234,1	232,2	231,6	-56,9	-0,246	4,6	0,020	13,8	203,2	209,9	227,2	117,5	121,4	78,9	34,6	105,9	15,8	0,130	11,5	0,095
				-2,0	-122,4	119,7	-1,5	0,7		-167,6		-167,8		-2,2	-126,0	118,6	-2,2	-126,0	118,6	-76,0	-3,5	55,4		-76,0
4	100	100	40	225,4	235,7	234,2	231,7	-55,0	-0,238	7,2	0,031	21,6	199,0	210,0	236,6	115,1	121,5	54,8	54,1	97,0	24,7	0,203	18,0	0,148
				-2,1	-122,7	120,5	-1,4	1,1		-166,4		-166,4		-1,5	-127,3	119,8	-1,5	-127,3	119,8	-74,7	-3,7	56,6		-74,7
5	100	100	20	223,2	237,6	235,1	231,8	-54,5	-0,236	10,0	0,043	30,1	194,5	210,6	246,7	112,5	121,9	28,5	75,2	87,4	34,3	0,282	25,1	0,206
				-2,3	-123,1	121,4	-1,3	1,6		-165,0		-165,1		-0,7	-128,0	121,1	-0,7	-188,7	121,1	-73,4	-4,2	58,0		-73,4
6	100	100	1	221,0	239,7	235,9	232,0	-53,2	-0,230	12,9	0,056	38,7	189,7	211,6	256,9	109,7	122,4	1,5	96,9	77,6	44,2	0,363	32,3	0,265
				-2,6	-123,4	122,3	-1,2	2,0		-163,7		-163,7		0,1	-130,0	122,5	0,1	-130,0	122,5	-72,0	-5,3	59,3		-72,0
7	100	100	0,1	220,9	239,8	236,0	232,0	-51,8	-0,224	13,1	0,056	39,2	189,5	211,7	127,4	109,6	122,5	0,1	98,0	77,1	44,7	0,367	32,7	0,268
				-2,7	-123,4	122,3	-1,2	2,0		-163,6		-163,6		0,1	-130,3	122,6	0,1	-130,0	122,6	-71,9	-5,4	59,4		-71,9
8	100	80	80	230,8	233,6	230,4	231,6	-51,8	-0,224	2,3	0,010	6,8	206,5	218,2	215,0	119,4	101,0	99,5	17,0	106,6	7,3	0,060	5,7	0,046
				-2,2	-121,3	118,9	-1,5	0,3		-108,3		-108,3		-4,1	-123,7	118,1	-4,1	-123,7	118,1	-16,6	-3,3	-6,7		-16,6
9	100	60	60	230,4	236,1	229,2	231,9	-117,0	-0,506	4,5	0,019	14,4	202,3	227,0	219,8	117,0	78,8	76,3	36,0	90,7	14,6	0,120	12,0	0,098
				-2,7	-120,9	119,5	-1,4	0,7		-106,6		-106,6		-4,8	-123,7	120,0	-4,7	-123,0	120,0	-14,9	-3,1	-6,8		-14,9
10	100	40	40	230,1	238,9	227,7	232,2	-117,9	-0,510	7,6	0,033	22,9	197,9	236,9	224,5	114,5	54,8	52,0	57,3	73,6	21,9	0,180	19,1	0,157
				-3,3	-120,5	120,0	-1,2	1,0		-104,6		-104,6		-5,6	-123,7	122,1	-5,6	-123,7	122,1	-12,9	-3,3	-7,0		-12,9
11	100	20	20	2320,0	242,1	225,7	232,4	-118,0	-0,510	10,9	0,047	32,6	193,1	248,2	229,1	111,7	28,7	26,5	81,5	55,5	29,2	0,240	27,1	0,223
				-4,0	-119,9	120,8	-1,0	1,3		-102,4		-102,4		-6,7	-123,6	124,4	-6,7	-123,6	124,4	-10,7	-4,4	-7,4		-10,7
12	100	1	1	230,1	245,3	223,4	232,7	-118,6	-0,513	14,3	0,062	43,0	188,5	260,3	233,3	109,0	1,5	1,4	107,4	37,3	35,9	0,295	35,8	0,294
				-4,6	-119,6	121,5	-0,8	1,6		-10,0		-100,0		-8,1	-123,4	126,9	-8,1	-123,4	126,9	-8,4	-7,9	-8,1		-8,4
13	100	0,1	0,1	230,2	245,5	226,2	232,7	-119,4	-0,516	14,5	0,063	43,5	188,3	260,9	233,5	108,9	0,2	0,1	108,7	36,4	36,3	0,298	36,3	0,298
				-4,7	-119,3	121,6	-0,8	1,7		-99,9		-99,9		-8,2	-123,4	127,0	-8,2	-123,4	127,0	-8,2	-8,2	-8,2		-8,2

$S_{Т.Н}=160$  кВА; ВЛ-3×35+35;  $\cos\varphi_H=1$ ;  $R_{3.ТН}=4$  Ом;  $R_{П.1}=R_{П.2}=28$  Ом

Продолжение таблицы 2.2

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Параметры электрической сети						
	А	В	С	$I_{\Delta 1}$ ,	$I_{\Delta 1^*}$ ,	$I_{\Delta 2}$ ,	$I_{\Delta 2^*}$ ,	$I_{\Pi 1}$ ,	$I_{\Pi 2}$ ,	$I_{3У.П.}$ ,
				А/град	о.е.	А/град	о.е.	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	0,0	0,000	0	0,000	0,0	0	0,0
				0,0		0				
2	100	100	80	0,1	0,001	0	0,000	0,1	0	0,1
				-59,2		0				
3	100	100	60	0,2	0,002	0	0,000	0,2	0	0,2
				-58,1		0				
4	100	100	40	0,3	0,003	0	0,000	0,4	0	0,3
				-56,8		0				
5	100	100	20	0,4	0,004	0	0,000	0,5	0	0,4
				-55,5		0				
6	100	100	1	0,6	0,005	0	0,000	0,6	0	0,6
				-54,1		0				
7	100	100	0,1	0,6	0,005	0	0,000	0,7	0	0,6
				-54,1		0				
8	100	80	80	0,1	0,001	0	0,000	0,1	0	0,1
				1,3		0				
9	100	60	60	0,2	0,002	0	0,000	0,2	0	0,2
				3,0		0				
10	100	40	40	0,3	0,003	0	0,000	0,4	0	0,3
				5,0		0				
11	100	20	20	0,5	0,004	0	0,000	0,5	0	0,5
				7,2		0				
12	100	1	1	0,6	0,005	0	0,000	0,7	0	0,6
				9,5		0				
13	100	0,1	0,1	0,6	0,005	0	0,000	0,7	0	0,6
				9,5		0				

 $S_{T.H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.TII}=4 \text{ Ом}; R_{II.1}=R_{II.2}=28 \text{ Ом}$

Таблица 2.3 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве фазы А,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$ 

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Параметры электрической сети																				
	А	В	С	$U_{AN}$ ,	$U_{BN}$ ,	$U_{CN}$ ,	$U_1$ ,	$U_2$ ,	$U_{2*}$ ,	$U_0$ ,	$U_{0*}$ ,	$U_{НС}$ ,	$U_{A2.N}$ ,	$U_{B2.N}$ ,	$U_{C2.N}$ ,	$I_A$ ,	$I_B$ ,	$I_C$ ,	$I_N$ ,	$I_1$ ,	$I_2$ ,	$I_{2*}$ ,	$I_0$ ,	$I_{0*}$ ,
				В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	о.е.	В/град	о.е.	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	236,0	220,9	239,8	232,0	2,1	0,009	13,1	0,057	39,3	0,0	189,4	211,7	0,0	109,6	122,5	97,2	77,0	44,7	0,367	32,7	0,269
				2,4	-122,7	116,6	-5,4	-1,2		68,2		76,4	0,0	-119,9	109,7	92,4	-119,9	109,8	167,9	-5,4	179,4		168,1	
2	100	100	80	233,8	222,3	241,0	232,1	1,8	0,008	12,4	0,054	37,2	0,0	188,5	220,2	0,0	109,0	101,9	92,5	70,2	39,3	0,323	31,0	0,255
				2,3	-123,1	117,3	-1,2	60,8		87,1		87,1	0,0	-121,3	110,9	92,4	-121,3	110,9	178,6	-5,1	171,9		178,7	
3	100	100	60	231,4	223,9	242,1	232,3	1,6	0,007	12,1	0,052	36,2	0,0	187,8	229,4	0,0	108,6	79,6	89,8	62,7	34,7	0,285	30,2	0,248
				2,2	-123,5	118,0	-1,1	49,9		99,5		99,5	0,0	-122,8	112,1	92,6	-122,8	112,1	-168,9	-4,9	161,1		-168,8	
4	100	100	40	228,9	225,7	243,3	232,4	1,5	0,006	12,3	0,053	36,8	0,0	187,5	239,2	0,0	108,4	55,4	91,4	54,6	32,0	0,263	30,7	0,252
				2,0	-123,9	118,9	-1,0	35,0		113,2		113,2	0,0	-124,4	113,5	92,4	-124,4	113,5	-155,2	-5,1	146,2		-155,1	
5	100	100	20	226,2	227,8	244,4	232,6	1,5	0,006	13,1	0,057	39,2	0,0	187,6	249,7	0,0	108,5	28,9	97,4	45,8	32,2	0,265	32,7	0,268
				1,8	-124,3	119,8	-0,9	17,4		127,1		127,1	0,0	-126,3	115,0	92,4	-126,3	115,0	-141,3	-6,0	128,5		-141,2	
6	100	100	1	223,5	230,0	245,4	232,7	1,7	0,007	14,4	0,063	43,3	0,0	188,2	260,4	0,0	108,9	1,5	107,6	36,8	36,0	0,296	36,1	0,296
				1,6	-124,7	120,7	-0,8	1,4		139,5		139,5	0,0	-128,1	116,5	92,3	-128,1	116,5	-128,9	-8,1	112,5		-128,8	
7	100	100	0,1	223,3	230,1	245,5	232,7	1,7	0,007	14,5	0,063	43,5	0,0	188,2	260,9	0,0	108,9	0,2	108,2	36,4	36,3	0,298	36,3	0,298
				1,6	-124,7	120,7	-0,8	0,7		140,0		140,0	0,0	-128,2	116,6	92,3	-128,2	116,6	-128,4	-8,2	111,9		128,3	
8	100	80	80	235,3	222,9	239,2	232,3	1,7	0,007	11,1	0,048	33,3	0,0	196,1	216,3	0,0	90,8	100,1	82,8	63,5	35,9	0,295	27,8	0,228
				1,9	-122,4	117,1	-1,1	68,5		78,1		78,1	0,0	-120,1	111,3	92,0	-120,1	111,3	169,7	-4,6	179,7		169,8	
9	100	60	60	234,6	225,2	238,3	232,6	1,2	0,005	8,9	0,038	26,5	0,0	203,7	220,9	0,0	70,7	76,7	66,0	49,0	27,0	0,222	22,1	0,182
				1,5	-122,0	117,7	-0,9	68,8		80,1		80,1	0,0	-120,3	113,1	91,5	-120,3	113,1	171,7	-3,7	179,9		171,8	
10	100	40	40	234,0	227,7	237,1	232,9	0,8	0,004	6,3	0,027	18,9	0,0	212,3	225,4	0,0	49,1	52,2	46,9	33,7	18,1	0,148	15,7	0,129
				0,9	-121,6	118,3	-0,8	68,8		82,4		82,4	0,0	-120,4	115,0	91,0	-120,4	115,0	174,0	-2,8	-180,0		174,1	
11	100	20	20	233,5	230,4	235,6	233,2	0,4	0,002	3,4	0,015	10,1	0,0	222,2	229,6	0,0	25,7	26,6	25,0	17,4	9,0	0,074	8,4	0,069
				0,3	-121,1	118,9	-0,6	68,7		84,9		84,9	0,0	-120,5	117,2	90,4	-120,5	117,2	176,5	-1,7	179,9		176,6	
12	100	1	1	233,5	233,4	233,6	233,5	0,0	0,000	0,2	0,001	0,5	0,0	232,9	233,3	0,0	1,4	1,4	1,3	0,9	0,5	0,004	0,4	0,004
				-0,4	-120,5	119,5	-0,5	68,4		87,7		87,7	0,0	-120,4	119,4	89,6	-120,4	119,4	179,3	-0,5	179,6		179,4	
13	100	0,1	0,1	233,5	233,5	233,5	233,5	0,0	0,000	0,0	0,000	0,1	0,0	233,4	233,5	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,000	0,0	0,000
				-0,4	-120,4	119,6	-0,4	68,4		87,9		87,9	0,0	-120,4	119,5	89,6	-120,4	119,5	179,4	-0,4	179,6		179,5	

$$S_{Т.Н}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.П}=4 \text{ Ом}; R_{П1}=R_{П2}=28 \text{ Ом}$$

Продолжение таблицы 2.3

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Параметры электрической сети						
	A	B	C	$I_{\Delta 1}$ , А/град	$I_{\Delta 1^*}$ , о.е.	$I_{\Delta 2}$ , А/град	$I_{\Delta 2^*}$ , о.е.	$I_{\Pi 1}$ , А/град	$I_{\Pi 2}$ , А/град	$I_{3У.П.}$ , А/град
1	100	100	100	0,99	0,008	98,17	0,807	0,14	0,59	0,55
				-174,10		168,10				
2	100	100	80	0,95	0,008	93,04	0,765	0,14	0,55	0,52
				-163,40		178,80				
3	100	100	60	0,92	0,008	90,63	0,745	0,13	0,54	0,51
				-151,00		-168,80				
4	100	100	40	0,93	0,008	92,00	0,756	0,13	0,55	0,52
				-137,20		-155,10				
5	100	100	20	0,99	0,008	97,99	0,805	0,14	0,59	0,55
				-123,40		-141,20				
6	100	100	1	1,10	0,009	108,30	0,890	0,16	0,65	0,61
				-110,90		-128,80				
7	100	100	0,1	1,10	0,009	108,90	0,895	0,16	0,65	0,61
				-110,40		-128,00				
8	100	80	80	0,85	0,007	83,29	0,684	0,12	0,5	0,47
				-172,30		169,80				
9	100	60	60	0,68	0,006	66,42	0,546	0,096	0,39	0,37
				-170,40		171,80				
10	100	40	40	0,48	0,004	47,21	0,388	0,069	0,28	0,27
				-168,10		174,10				
11	100	20	20	0,26	0,002	25,22	0,207	0,037	0,15	0,14
				-165,50		176,60				
12	100	1	1	0,01	0,000	1,35	0,011	0,002	0,008	0,008
				-162,80		179,50				
13	100	0,1	0,1	0,00	0,000	0,13	0,001	0,0002	0,0008	0,0008
				-162,60		179,50				

 $S_{T.H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.П.1}=4 \text{ Ом}; R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$

Таблица 2.4 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве фазы А,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$ 

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Параметры электрической сети																				
	А	В	С	$U_{AN}$ ,	$U_{BN}$ ,	$U_{CN}$ ,	$U_1$ ,	$U_2$ ,	$U_{2*}$ ,	$U_0$ ,	$U_{0*}$ ,	$U_{НС}$ ,	$U_{A2.N}$ ,	$U_{B2.N}$ ,	$U_{C2.N}$ ,	$I_A$ ,	$I_B$ ,	$I_C$ ,	$I_N$ ,	$I_1$ ,	$I_2$ ,	$I_{2*}$ ,	$I_0$ ,	$I_{0*}$ ,
				В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	о.е.	В/град	о.е.	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	236,0	220,9	239,8	232,0	2,1	0,009	13,1	0,057	39,2	0,0	189,4	211,7	0,0	109,6	122,5	97,6	77,0	44,7	0,367	32,7	0,269
				2,4	-122,7	116,6	-1,2	68,2		76,4		76,4	0,0	-119,9	109,7	0,0	-119,9	109,7	168,1	-5,4	179,4		168,1	
2	100	100	80	233,8	222,3	241,0	232,1	1,8	0,008	12,4	0,054	37,2	0,0	188,5	220,2	0,0	109,0	101,9	92,5	70,2	39,3	0,323	31,0	0,255
				2,3	-123,1	117,3	-1,2	60,8		87,1		87,1	0,0	-121,3	110,9	0,0	-121,3	110,9	178,6	-5,1	171,9		178,7	
3	100	100	60	231,4	223,9	242,1	232,3	1,6	0,007	12,1	0,052	36,2	0,0	187,8	229,4	0,0	108,6	79,6	90,1	62,7	34,7	0,285	30,2	0,248
				2,2	-123,5	118,0	-1,1	49,9		99,5		99,5	0,0	-122,8	112,1	0,0	-122,8	112,1	-168,9	-4,9	161,1		-168,8	
4	100	100	40	228,9	225,7	243,3	232,4	1,5	0,006	12,3	0,053	36,8	0,0	187,5	239,2	0,0	108,4	55,4	91,4	54,6	32,0	0,263	30,7	0,252
				2,0	-123,9	118,9	-1,0	35,0		113,2		113,2	0,0	-124,4	113,5	0,0	-124,4	113,5	-155,2	-5,1	146,2		-155,1	
5	100	100	20	226,2	227,8	244,4	232,6	1,5	0,006	13,1	0,057	39,2	0,0	187,6	249,7	0,0	108,5	28,9	97,4	45,8	32,2	0,265	32,7	0,268
				1,8	-124,3	119,8	-0,9	17,4		127,1		127,1	0,0	-126,3	115,0	0,0	-126,3	115,0	-141,3	-6,0	128,5		-141,2	
6	100	100	1	223,5	230,0	245,4	232,7	1,7	0,007	14,4	0,063	43,3	0,0	188,2	260,4	0,0	108,9	1,5	107,6	36,8	36,0	0,296	36,1	0,296
				1,6	-124,7	120,7	-0,8	1,4		139,5		139,5	0,0	-128,1	116,5	0,0	-128,1	116,5	-128,9	-8,1	112,5		-128,8	
7	100	100	0,1	223,3	230,1	245,5	232,7	1,7	0,007	14,5	0,063	43,5	0,0	188,2	260,9	0,0	108,9	0,2	108,2	36,4	36,3	0,298	36,3	0,298
				1,6	-124,7	120,7	-0,8	0,7		140,0		140,0	0,0	-128,2	116,6	0,0	-128,2	116,6	-128,4	-8,2	111,9		128,3	
8	100	80	80	235,3	22,9	239,2	232,3	1,7	0,007	11,1	0,048	33,3	0,0	196,1	216,3	0,0	90,8	100,1	82,8	63,5	35,9	0,295	27,8	0,228
				1,9	-122,4	117,1	-1,1	68,5		78,1		78,1	0,0	-120,1	111,3	0,0	-120,1	111,3	169,7	-4,6	179,7		169,8	
9	100	60	60	234,6	225,2	238,3	232,6	1,2	0,005	8,9	0,038	26,5	0,0	203,7	220,9	0,0	70,7	76,7	66,0	49,0	27,0	0,222	22,1	0,182
				1,5	-122,0	117,7	-0,9	68,8		80,1		80,1	0,0	-120,3	113,1	0,0	-120,3	113,1	171,7	-3,7	179,9		171,8	
10	100	40	40	234,0	227,7	237,1	232,9	0,8	0,004	6,3	0,027	18,9	0,0	212,3	225,4	0,0	49,1	52,2	46,9	33,7	18,1	0,148	15,7	0,129
				0,9	-121,6	118,3	-0,8	68,8		82,4		82,4	0,0	-120,4	115,0	0,0	-120,4	115,0	174,0	-2,8	-180,0		174,1	
11	100	20	20	233,6	230,4	235,6	233,2	0,4	0,002	3,4	0,015	10,1	0,0	222,2	229,6	0,0	25,7	26,6	25,1	17,4	9,0	0,074	8,4	0,069
				0,3	-121,1	118,9	-0,6	68,7		84,9		84,9	0,0	-120,5	117,2	0,0	-120,5	117,2	176,5	-1,7	179,9		176,6	
12	100	1	1	233,5	233,4	233,6	233,5	0,0	0,000	0,2	0,001	0,5	0,0	232,9	233,3	0,0	1,3	1,4	1,3	0,9	0,5	0,004	0,4	0,004
				-0,4	-120,5	119,5	-0,5	68,4		87,7		87,7	0,0	-120,4	119,4	0,0	-120,4	119,4	179,3	-0,5	179,6		179,4	
13	100	0,1	0,1	233,5	233,5	233,5	233,5	0,0	0,000	0,0	0,000	0,1	0,0	233,4	233,5	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,000	0,0	0,000
				-0,4	-120,4	119,6	-0,4	68,4		87,9		87,9	0,0	-120,4	119,5	0,0	-120,4	119,5	-128,4	-0,4	0,2		0,2	

 $S_{Т.Н}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_{Н}=1; R_{3.ПН}=4 \text{ Ом}; R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$

Продолжение таблицы 2.4

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Параметры электрической сети						
	A	B	C	$I_{\Delta 1},$ А/град	$I_{\Delta 1*},$ о.е.	$I_{\Delta 2},$ А/град	$I_{\Delta 2*},$ о.е.	$I_{\Pi 1},$ А/град	$I_{\Pi 2},$ А/град	$I_{3У.П.},$ А/град
1	100	100	100	0,6	0,005	98,1	0,806	0,1	0,7	0,0
				-174,0		168,1				
2	100	100	80	0,5	0,004	93,0	0,764	0,1	0,6	0,0
				-163,4		178,7				
3	100	100	60	0,5	0,004	90,6	0,744	0,1	0,6	0,0
				-150,9		-168,8				
4	100	100	40	0,5	0,004	92,0	0,756	0,1	0,6	0,0
				-137,2		-155,1				
5	100	100	20	0,6	0,005	97,9	0,805	0,1	0,7	0,0
				-123,4		-141,2				
6	100	100	1	0,6	0,005	108,2	0,889	0,1	0,7	0,0
				-110,9		-128,8				
7	100	100	0,1	0,6	0,005	108,8	0,894	0,1	0,7	0,0
				-110,4		-128,3				
8	100	80	80	0,5	0,004	83,2	0,684	0,1	0,6	0,0
				-172,3		169,8				
9	100	60	60	0,4	0,003	66,4	0,546	0,1	0,4	0,0
				-170,3		179,0				
10	100	40	40	0,3	0,002	47,2	0,388	0,0	0,3	0,0
				-168,1		174,1				
11	100	20	20	0,2	0,001	25,2	0,207	0,0	0,2	0,0
				-165,5		176,6				
12	100	1	1	0,0	0,000	1,4	0,011	0,0	0,1	0,0
				-162,7		179,4				
13	100	0,1	0,1	0,0	0,000	0,1	0,001	0,0	0,0	0,0
				-162,6		179,5				

 $S_{T.H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.П.П.}=4 \text{ Ом}; R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$

Таблица 2.5 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве нулевого провода,  $R_{3y,II} = 30 \text{ Ом}$ 

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAXC}$			Параметры электрической сети																				
	А	В	С	$U_{AN,}$	$U_{BN,}$	$U_{CN,}$	$U_1,$	$U_2,$	$U_{2*},$	$U_0,$	$U_{0*},$	$U_{HC,}$	$U_{A2.N,}$	$U_{B2.N,}$	$U_{C2.N,}$	$I_A,$	$I_B,$	$I_C,$	$I_N,$	$I_1,$	$I_2,$	$I_{2*},$	$I_0,$	$I_{0*},$
				В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	о.е.	В/град	о.е.	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	231,3	231,3	231,3	231,3	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	210,3	210,3	210,3	121,7	121,7	121,7	0,0	121,7	0,0	0,000	0,0	0,000
				-1,7	-121,7	118,3	-1,7	0,0		0,0		0,0	-3,6	-123,6	116,4	-3,6	-123,6	116,4	0,0	-3,6	0,0		0,0	
2	100	100	80	231,6	231,1	231,1	231,4	0,4	0,002	0,1	0,000	0,2	204,4	203,2	228,6	118,2	117,5	105,8	0,1	113,7	7,9	0,065	0,2	0,001
				-1,7	-121,6	118,5	-1,6	-57,6		-155,1		-155,1	-0,2	-126,9	116,8	-0,3	-126,9	116,8	-63,5	-3,5	53,6		-63,5	
3	100	100	60	232,1	230,8	232,0	231,6	0,8	0,003	0,1	0,001	0,4	198,1	195,9	250,4	114,6	113,3	86,9	0,2	104,3	17,4	0,143	0,3	0,003
				-1,7	-121,5	118,7	-1,5	-57,1		-154,7		-154,7	4,1	-131,1	117,3	4,1	-131,1	117,3	-63,0	-3,2	54,1		-64,0	
4	100	100	40	232,6	230,5	232,4	231,8	1,3	0,006	0,2	0,001	0,7	191,7	188,9	276,7	110,9	109,3	64,0	0,4	92,8	28,8	0,237	0,5	0,004
				-1,7	-121,4	118,9	-1,4	-56,5		-154,1		-154,1	9,6	-136,6	117,9	9,6	-136,6	117,9	-62,4	-3,1	54,7		-62,4	
5	100	100	20	232,6	230,5	232,4	231,8	1,3	0,006	0,3	0,001	1,0	191,7	188,9	276,7	110,9	109,3	64,0	0,5	92,8	28,8	0,237	0,8	0,007
				-1,7	-121,4	118,9	-1,4	-56,5		-153,3		-153,3	9,6	-136,6	117,9	9,6	-136,6	117,9	-61,7	-3,1	54,7		-61,7	
6	100	100	1	234,0	229,6	233,5	232,4	2,7	0,012	0,5	0,002	1,3	182,2	182,0	348,0	105,4	105,3	2,0	0,8	61,8	59,8	0,492	1,1	0,009
				-1,6	-121,1	119,5	-1,1	-54,9		-152,5		-152,5	25,8	-153,1	119,5	25,8	-153,1	119,5	-60,8	-3,6	56,3		-60,8	
7	100	100	0,1	234,0	229,6	233,5	232,4	2,8	0,012	0,5	0,002	1,4	182,1	182,1	350,0	105,4	105,3	0,2	0,8	60,9	60,7	0,499	1,1	0,009
				-1,6	-121,1	119,6	-1,1	-54,8		-152,4		-152,4	26,3	-153,6	119,6	26,3	-153,6	119,6	-60,8	-3,6	56,4		-60,7	
8	100	80	80	231,4	231,4	231,9	231,6	0,3	0,001	0,1	0,000	0,2	195,6	221,8	223,1	113,2	102,7	103,3	0,1	106,2	6,9	0,057	0,2	0,001
				-1,6	-121,5	118,5	-1,5	-117,2		-95,3		-95,3	-3,4	-126,5	120,2	-3,4	-126,5	120,2	-3,7	-3,2	-6,0		-3,7	
9	100	60	60	231,7	231,6	232,5	231,9	0,6	0,003	0,2	0,001	0,5	175,3	238,1	240,8	101,4	82,6	83,6	0,3	88,7	12,7	0,104	0,4	0,003
				-1,5	-121,2	118,7	-1,4	-116,3		-95,0		-95,0	-3,1	130,3	124,9	-3,1	-130,3	124,9	-3,4	-2,8	-5,1		-3,4	
10	100	40	40	232,0	231,9	233,0	232,3	0,7	0,003	0,3	0,001	0,8	145,0	263,4	267,3	83,9	61,0	61,9	0,5	67,8	16,1	0,132	0,7	0,006
				-1,3	-121,0	118,3	-1,1	-115,2		-94,6		-94,6	-2,6	-135,3	130,9	-2,6	-135,3	130,9	-3,0	-2,3	-4,0		-2,9	
11	100	20	20	232,5	232,4	233,5	232,8	0,7	0,003	0,5	0,002	1,5	95,6	308,3	312,3	55,3	35,7	36,1	0,8	40,9	14,4	0,119	1,2	0,010
				-1,0	-120,7	119,2	-0,9	-113,8		-93,9		-93,9	-1,9	-141,9	138,8	-1,9	-141,9	138,8	-2,2	-1,6	-2,6		-2,2	
12	100	1	1	233,5	233,4	233,6	233,5	0,1	0,000	0,9	0,004	2,6	6,8	397,3	397,7	4,0	2,3	2,3	1,4	2,7	1,3	0,011	2,2	0,018
				-0,4	-120,5	119,5	-0,5	-111,8		-92,6		-92,6	-0,5	-150,0	148,9	-0,5	-150,0	148,9	-1,0	-0,5	179,6		-0,9	
13	100	0,1	0,1	233,4	233,4	233,5	233,5	0,1	0,000	0,9	0,004	2,7	0,7	403,7	403,8	0,4	0,2	0,2	1,5	0,3	0,1	0,001	2,2	0,018
				-0,5	-120,5	119,6	-0,5	-111,8		-92,5		-92,5	0,5	-150,4	149,5	-0,5	-150,4	149,5	-0,9	-0,4	-0,5		-0,8	

$S_{T,H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3,III}=4 \text{ Ом}; R_{II,1}=R_{II,2}=28 \text{ Ом}$

Продолжение таблицы 2.5

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Параметры электрической сети						
	А	В	С	$I_{\Delta 1}$ ,	$I_{\Delta 1^*}$ ,	$I_{\Delta 2}$ ,	$I_{\Delta 2^*}$ ,	$I_{\Pi 1}$ ,	$I_{\Pi 2}$ ,	$I_{3У.П.}$ ,
				А/град	о.е.	А/град	о.е.	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
2	100	100	80	0,4	0,003	0,5	0,004	0,1	0,0	0,5
				-63,5		-63,5				
3	100	100	60	0,8	0,006	1,0	0,008	0,1	0,1	1,0
				-63,0		-63,0				
4	100	100	40	1,3	0,010	1,6	0,013	0,2	0,2	1,6
				-62,4		-62,4				
5	100	100	20	1,9	0,015	2,4	0,020	0,3	0,3	2,4
				-61,6		-61,7				
6	100	100	1	2,6	0,022	3,4	0,028	0,4	0,4	3,4
				-60,8		-60,8				
7	100	100	0,1	2,7	0,022	3,4	0,028	0,4	0,4	3,4
				-60,7		-60,7				
8	100	80	80	0,4	0,003	0,5	0,004	0,1	0,1	0,5
				-3,6		-3,7				
9	100	60	60	0,9	0,007	1,1	0,009	0,1	0,1	1,1
				-3,3		-3,4				
10	100	40	40	1,7	0,014	2,1	0,017	0,2	0,2	2,1
				-2,9		-2,9				
11	100	20	20	2,9	0,024	3,7	0,030	0,4	0,4	3,7
				-2,2		-2,2				
12	100	1	1	5,0	0,041	6,5	0,053	0,7	0,7	6,5
				-0,9		-0,9				
13	100	0,1	0,1	5,2	0,042	6,6	0,055	0,7	0,7	6,6
				-0,8		-0,8				

 $S_{T.H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.П.П.}=4 \text{ Ом}; R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$



Таблица 2.6 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве нулевого провода,  $R_{3y,II} = \infty \text{ Ом}$ 

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAXC}$			Параметры электрической сети																				
	А	В	С	$U_{AN,}$	$U_{BN,}$	$U_{CN,}$	$U_1,$	$U_2,$	$U_{2*},$	$U_0,$	$U_{0*},$	$U_{HC,}$	$U_{A2.N,}$	$U_{B2.N,}$	$U_{C2.N,}$	$I_A,$	$I_B,$	$I_C,$	$I_N,$	$I_1,$	$I_2,$	$I_{2*},$	$I_0,$	$I_{0*},$
				В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	о.е.	В/град	о.е.	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	231,3	231,3	231,3	231,3	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	210,3	210,3	210,3	121,7	121,7	121,7	0,0	121,7	0,0	0,000	0,0	0,000
				-1,7	-121,7	118,3	-1,7	0,0		0,0		0,0		0,0	-3,6	-123,6	116,4	-3,6	-123,6	116,4	0,0	-3,6	0,0	
2	100	100	80	231,6	231,1	231,1	231,4	0,4	0,002	0,0	0,000	0,0	204,4	203,2	228,6	118,2	117,5	105,8	0,0	113,7	7,9	0,065	0,0	0,000
				-1,7	-121,6	118,5	-1,6	-57,6		0,0		0,0		0,0	-0,2	-126,9	116,8	-0,2	-126,9	116,8	0,0	-3,5	53,6	
3	100	100	60	232,1	230,8	232,0	231,6	0,8	0,003	0,0	0,000	0,0	198,1	195,9	250,4	114,6	113,3	86,9	0,0	104,3	17,4	0,143	0,0	0,000
				-1,7	-121,5	118,7	-1,5	-57,1		0,0		0,0		0,0	4,1	-131,1	117,3	4,1	-131,1	117,3	0,0	-3,2	54,1	
4	100	100	40	232,6	230,5	232,4	231,8	1,3	0,006	0,0	0,000	0,0	191,7	188,9	276,7	110,9	109,3	64,0	0,0	92,8	28,8	0,237	0,0	0,000
				-1,7	-121,4	118,9	-1,4	-56,5		0,0		0,0		0,0	9,6	-136,6	117,9	9,6	-136,6	117,9	0,0	-3,1	54,7	
5	100	100	20	232,6	230,5	232,4	231,8	1,3	0,006	0,0	0,000	0,0	191,7	188,9	276,7	110,9	109,3	64,0	0,0	92,8	28,8	0,237	0,0	0,000
				-1,7	-121,4	118,9	-1,4	-56,5		0,0		0,0		0,0	9,6	-136,6	117,9	9,6	-136,6	117,9	0,0	-3,1	54,7	
6	100	100	1	234,0	229,6	233,5	232,4	2,7	0,012	0,0	0,000	0,0	182,2	182,0	348,0	105,4	105,3	2,0	0,0	61,8	59,8	0,492	0,0	0,000
				-1,6	-121,1	119,5	-1,1	-54,9		0,0		0,0		0,0	25,8	-153,1	119,5	25,8	-153,1	119,5	0,0	-3,6	56,3	
7	100	100	0,1	234,0	229,6	233,5	232,4	2,8	0,012	0,0	0,000	0,0	182,1	182,1	350,0	105,4	105,3	0,2	0,0	60,9	60,7	0,499	0,0	0,000
				-1,6	-121,1	119,6	-1,1	-54,8		0,0		0,0		0,0	26,3	-153,6	119,6	26,3	-153,6	119,6	0,0	-3,6	56,4	
8	100	80	80	231,4	231,4	231,9	231,6	0,3	0,001	0,0	0,000	0,0	195,6	221,8	223,1	113,2	102,7	103,3	0,0	106,2	6,9	0,057	0,0	0,000
				-1,6	-121,5	118,5	-1,5	-117,2		0,0		0,0		0,0	-3,4	-126,5	120,2	-3,4	-126,5	120,2	0,0	-3,2	-6,0	
9	100	60	60	231,7	231,6	232,5	231,9	0,6	0,003	0,0	0,000	0,0	175,3	238,1	240,8	101,4	82,6	83,6	0,0	88,7	12,7	0,104	0,0	0,000
				-1,5	-121,2	118,7	-1,4	-116,3		0,0		0,0		0,0	-3,1	130,3	124,9	-3,1	-130,3	124,9	0,0	-2,8	-5,1	
10	100	40	40	232,0	231,9	233,0	232,3	0,7	0,003	0,0	0,000	0,0	145,0	263,4	267,3	83,9	61,0	61,9	0,0	67,8	16,1	0,132	0,0	0,000
				-1,3	-121,0	118,3	-1,1	-115,2		0,0		0,0		0,0	-2,6	-135,3	130,9	-2,6	-135,3	130,9	0,0	-2,3	-4,0	
11	100	20	20	232,5	232,4	233,5	232,8	0,7	0,003	0,0	0,000	0,0	95,6	308,3	312,3	55,3	35,7	36,1	0,0	40,9	14,4	0,119	0,0	0,000
				-1,0	-120,7	119,2	-0,9	-113,8		0,0		0,0		0,0	-1,9	-141,9	138,8	-1,9	-141,9	138,8	0,0	-1,6	-2,6	
12	100	1	1	233,5	233,4	233,6	233,5	0,1	0,000	0,0	0,000	0,0	6,8	397,3	397,7	4,0	2,3	2,3	0,0	2,7	1,3	0,011	0,0	0,000
				-0,4	-120,5	119,5	-0,5	-111,8		0,0		0,0		0,0	-0,5	-150,0	148,9	-0,5	-150,0	148,9	0,0	-0,5	179,6	
13	100	0,1	0,1	233,4	233,4	233,5	233,5	0,1	0,000	0,0	0,000	0,0	0,7	403,7	403,8	0,4	0,2	0,2	0,0	0,3	0,1	0,001	0,0	0,000
				-0,5	-120,5	119,6	-0,5	-111,8		0,0		0,0		0,0	0,5	-150,4	149,5	-0,5	-150,4	149,5	0,0	-0,4	-0,5	

$S_{T,H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3,III}=4 \text{ Ом}; R_{II,1}=R_{II,2}=28 \text{ Ом}$

Продолжение таблицы 2.6

Номер опыта	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Параметры электрической сети						
	А	В	С	$I_{\Delta 1}$ ,	$I_{\Delta 1^*}$ ,	$I_{\Delta 2}$ ,	$I_{\Delta 2^*}$ ,	$I_{П1}$ ,	$I_{П2}$ ,	$I_{ЗУ.П.}$ ,
				А/град	о.е.	А/град	о.е.	А/град	А/град	А/град
1	100	100	100	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
2	100	100	80	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
3	100	100	60	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
4	100	100	40	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
5	100	100	20	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
6	100	100	1	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
7	100	100	0,1	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
8	100	80	80	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
9	100	60	60	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
10	100	40	40	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
11	100	20	20	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
12	100	1	1	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				
13	100	0,1	0,1	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
				0,0		0,0				

 $S_{T.H}=160 \text{ кВА}; \text{ВЛ-3}\times\text{35}+\text{35}; \cos\varphi_H=1; R_{3.П1}=4 \text{ Ом}; R_{П.1}=R_{П.2}=28 \text{ Ом}$

Таблица 2.7 – Исследование режимов работы физической модели 380/177 В – 17.05.2016 г.

 $S_T = 0,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $Y/Y_H$ , 380/177 В, Дифференциальные токи. Ресурс № 3026

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_0$	$U_1$	$U_2$	$I_{A1}$	$I_{A2}$	$I_H$	$I_0$	$I_1$	$I_2$
1. Нормальный режим работы																
1.1. $R_A = R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
1	11:13	105,87	104,80	104,91	183,51	180,80	182,28	0,49	182,18	1,57	0,054	0,000	0,053	0,008	0,029	0,024
1.2. $R_A = \infty, R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
2	11:17	108,78	104,81	105,85	186,64	180,78	185,86	0,89	184,40	3,66	1,126	0,000	1,136	0,006	0,590	0,629
1.3. $R_A = R_B = \infty, R_C = 80 \text{ Ом}$																
3	11:21	109,20	106,90	105,91	188,54	183,54	185,66	0,62	185,89	2,90	1,171	0,000	1,175	0,000	0,625	0,647
1.4. $R_A = R_B = R_C = \infty$																
4	11:25	109,44	107,65	108,10	188,86	185,83	188,55	0,36	187,73	1,91	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000

Таблица 2.8 – Исследование режимов работы физической модели 380/177 В – 26.04.2016 г.

 $S_T = 0,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $Y/Y_H$ , 380/177 В, Точка 3 (за трансформатором), Ресурс № 3026

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_0$	$U_1$	$U_2$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$	$I_1$	$I_2$
1. Нормальный режим работы $R_A = R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
1	11:13	107,41	106,24	106,60	185,89	183,55	185,24	0,44	184,88	1,39	1,275	1,264	1,255	0,000	1,276	0,000
1.1. $R_A = \infty, R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
2	11:17	110,34	106,62	107,48	189,66	183,79	188,48	0,91	187,28	3,56	0,000	1,216	1,251	0,431	0,755	0,432
1.2. $R_A = R_B = \infty, R_C = 80 \text{ Ом}$																
3	11:21	110,68	108,78	107,46	191,61	186,59	188,03	0,63	188,72	2,98	0,000	0,000	1,196	0,326	0,329	0,353
1.3. $R_A = R_B = R_C = \infty$																
4	11:25	110,80	109,66	109,64	191,90	189,12	190,71	0,39	190,56	1,61	0,000	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000
2. Обрыв фазы А																
2.1. $R_A = R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
5	11:29	14,69	95,40	88,07	104,83	183,01	82,06	0,26	102,57	80,92	0,171	1,128	1,046	0,000	0,629	0,539
2.2. $R_A = \infty, R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
6	11:33	18,35	99,33	84,30	116,12	183,38	69,39	0,43	100,43	84,97	0,000	1,159	1,015	0,029	0,581	0,581
2.3. $R_A = R_B = \infty, R_C = 80 \text{ Ом}$																
7	11:37	60,30	112,57	81,94	160,68	187,41	90,14	0,16	56,17	140,94	0,000	0,000	0,929	0,324	0,246	0,210
2.4. $R_A = R_B = R_C = \infty$																
8	11:41	20,83	104,86	84,81	125,62	189,66	64,11	0,32	95,05	97,89	0,000	0,000	0,000	0,051	0,000	0,000
3. Обрыв фазы В																
3.1. $R_A = R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
9	11:45	91,78	0,62	93,74	92,10	93,41	185,51	0,86	92,64	92,85	1,098	0,000	1,100	0,000	0,591	0,629
3.2. $R_A = \infty, R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
10	11:49	103,57	33,27	88,35	127,29	82,79	189,34	1,01	121,04	70,57	0,000	0,339	0,981	0,325	0,377	0,216
3.3. $R_A = R_B = \infty, R_C = 80 \text{ Ом}$																
11	11:53	102,72	56,39	94,90	136,69	117,58	188,93	0,74	143,52	46,19	0,000	0,000	1,051	0,268	0,276	0,324
3.4. $R_A = R_B = R_C = \infty$																
12	11:57	94,72	0,94	96,66	94,79	96,60	191,38	0,79	95,24	96,13	0,000	0,000	0,000	0,024	0,000	0,000
4. Обрыв фазы С																
4.1. $R_A = R_B = R_C = 80 \text{ Ом}$																
13	12:01	89,11	96,90	15,64	185,52	107,56	82,04	0,48	81,92	104,21	1,054	1,152	0,184	0,005	0,539	0,629

Продолжение таблицы 2.8

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
4.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
14	12:05	100,82	91,11	38,79	187,78	99,11	121,75	0,78	61,05	127,43	0,000	1,033	0,423	0,362	0,216	0,439
4.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
15	12:11	90,33	101,38	17,71	191,24	115,08	80,23	0,43	84,98	107,36	0,000	0,000	0,204	0,100	0,045	0,030
4.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
16	2:13	85,43	105,86	22,19	191,28	127,96	63,44	0,61	99,17	95,70	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000

Таблица 2.9 – Исследование режимов работы физической модели 380/177 В – 17.05.2016 г.

S<sub>T</sub> = 0,5 кВ·А, Y/Y<sub>H</sub>, 380/177 В, Точка 4, Ресурс № 3026

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
1. Нормальный режим работы R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
1	11:39	100,09	97,78	98,93	172,10	169,27	172,70	0,46	171,34	100,09	1,256	1,236	1,234	0,000	1,187	0,000
1.1. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
2	11:43	56,86	89,51	91,72	121,44	168,78	123,93	6,52	130,78	56,86	0,672	1,199	1,226	0,284	0,900	0,284
1.2. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
3	11:47	23,03	27,57	71,54	17,04	97,35	94,05	8,24	57,00	23,03	0,000	0,218	1,179	0,386	0,364	0,360
1.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
4	11:52	0,12	0,12	0,12	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,12	0,000	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000
2. Обрыв фазы А																
2.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
5	11:55	12,20	72,86	67,15	80,32	139,52	63,03	1,12	78,41	12,20	0,155	0,925	0,845	0,053	0,491	0,441
2.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
6	11:59	3,78	87,40	82,30	90,24	169,64	79,67	1,15	87,34	3,78	0,027	1,139	1,001	0,048	0,627	0,557
2.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
7	12:03	17,48	31,02	56,98	26,11	84,93	72,97	5,61	47,27	17,48	0,000	0,332	0,920	0,310	0,297	0,281
2.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
8	12:07	4,43	4,43	13,09	0,00	17,50	17,50	1,43	10,11	4,43	0,000	0,000	0,221	0,107	0,058	0,058
3. Обрыв фазы В																
3.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
9	12:11	81,23	3,29	82,49	81,78	82,24	163,66	1,10	81,72	82,04	1,031	0,040	1,024	0,044	0,569	0,592
3.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
10	12:15	71,50	14,16	79,11	72,37	84,09	149,07	4,53	78,34	73,28	0,889	0,191	1,049	0,191	0,547	0,530
3.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
11	12:19	20,20	20,32	62,75	4,83	82,88	82,91	7,54	48,29	47,49	0,000	0,059	1,039	0,338	0,267	0,315
3.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
12	12:23	0,25	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000
4. Обрыв фазы С																
4.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
13	12:27	75,88	81,81	12,89	157,13	90,28	70,25	0,64	69,63	87,99	0,952	1,037	0,156	0,045	0,490	0,573
4.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
14	12:31	35,07	66,03	32,72	96,67	92,68	41,27	6,19	41,26	69,58	0,365	1,038	0,395	0,330	0,280	0,449
4.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
15	12:35	7,87	20,95	15,95	26,84	33,86	18,42	2,57	14,02	23,00	0,000	0,338	0,233	0,117	0,074	0,146
4.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
16	12:39	0,81	0,81	2,20	0,00	2,88	2,88	0,45	1,66	1,66	0,000	0,000	0,035	0,035	0,006	0,000

Таблица 2.10 – Исследование режимов работы физической модели 380/177 В – 17.05.2016 г.

S<sub>T</sub> = 2,5 кВ·А; S<sub>T</sub> = 0,5 кВ·А, Δ/Y<sub>H</sub>, 380/220/177 В, Дифференциальные токи. Ресурс № 3026

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>Δ1</sub>	I <sub>Δ2</sub>	I <sub>H</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
2. Нормальный режим работы																
2.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
1	10:50	109,28	108,26	108,94	188,76	187,78	188,92	0,33	188,47	0,70	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000
2.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
2	10:54	112,51	108,97	109,35	192,94	187,69	192,39	0,51	190,98	3,31	1,170	0,000	1,177	0,000	0,590	0,629
2.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
3	10:58	112,90	112,01	110,31	195,97	191,98	192,67	0,28	193,52	2,46	1,222	0,000	1,226	0,012	0,628	0,647
2.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
4	11:02	113,87	112,59	113,33	196,49	195,23	196,79	0,33	196,16	0,95	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000

Таблица 2.11 – Исследование режимов работы физической модели 380/177 В – 10.05.2016 г.

S<sub>T</sub> = 2,5 кВ·А; S<sub>T</sub> = 0,5 кВ·А, Δ/Y<sub>H</sub>, 380/220/177 В, Точка 3 (за трансформатором), Ресурс № 3026

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
1. Нормальный режим работы R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
1	09:44	111,75	110,74	111,46	193,10	192,08	193,23	0,37	192,79	0,72	1,321	1,303	1,320	0,000	1,295	0,000
1.1. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
2	09:48	114,82	111,16	111,94	196,69	191,88	196,73	0,54	195,08	3,23	0,243	1,269	1,297	0,424	0,875	0,424
1.2. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
3	09:52	114,98	114,00	112,55	199,40	195,66	196,49	0,28	197,16	2,30	0,000	0,234	1,260	0,391	0,363	0,388
1.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
4	09:58	115,78	114,42	115,29	199,67	198,50	200,22	0,32	199,45	1,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2. Обрыв фазы А																
2.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
5	10:02	57,98	110,80	53,26	168,75	164,02	6,35	0,13	98,19	93,96	0,688	1,314	0,628	0,000	0,629	0,629
2.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
6	10:06	77,91	111,49	45,93	186,84	152,13	61,45	0,30	73,65	123,21	0,000	1,274	0,578	0,324	0,443	0,577
2.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
7	10:10	77,38	114,49	46,35	189,74	156,54	56,81	0,17	77,95	123,15	0,000	0,000	0,529	0,149	0,138	0,113
2.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
8	10:14	62,10	115,03	53,18	177,13	168,20	8,98	0,10	99,29	100,27	0,000	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000
3. Обрыв фазы В																
3.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
9	10:18	53,29	56,78	111,63	4,06	168,41	164,91	0,59	97,25	95,20	0,625	0,675	1,316	0,000	0,629	0,581
3.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
10	10:22	75,97	52,43	112,15	68,23	157,56	183,87	0,44	128,94	66,84	0,000	0,643	1,280	0,244	0,607	0,475
3.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
11	10:26	52,44	59,91	112,87	8,49	172,74	165,29	0,37	95,60	99,67	0,000	0,000	1,255	0,432	0,352	0,379
3.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
12	10:30	53,64	61,17	116,14	8,60	177,27	169,76	0,53	98,15	102,33	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000
4. Обрыв фазы С																
4.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
13	10:34	110,50	59,62	50,73	170,00	12,08	161,14	0,30	91,56	99,75	1,302	0,713	0,601	0,000	0,647	0,647
4.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
14	10:38	114,00	60,71	52,18	174,59	11,90	166,09	0,57	94,24	102,56	0,000	0,658	0,543	0,432	0,153	0,215

Продолжение таблицы 2.11

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
4.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
15	10:42	114,32	86,55	37,84	199,19	70,53	146,02	0,41	124,55	80,46	0,000	0,000	0,438	0,128	0,086	0,108
4.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
16	10:45	114,63	67,94	46,16	182,56	22,11	160,75	0,35	101,47	97,91	0,000	0,000	0,000	0,029	0,000	0,000

Таблица 2.12 – Исследование режимов работы физической модели 380/177 В – 17.05.2016 г.

S<sub>T</sub> = 2,5 кВ·А; S<sub>T</sub> = 0,5 кВ·А, Δ/Y<sub>H</sub>, 380/220/177 В, Точка 4, Ресурс № 3026

№ пп	Время	Напряжение, В									Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
1. Нормальный режим работы R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
1	09:35	102,82	103,37	101,65	179,01	177,29	176,90	0,28	1,29	177,72	1,290	1,269	1,315	0,000	1,295	0,000
1.1. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
2	09:40	21,24	82,29	83,93	89,68	160,70	92,10	7,10	104,87	55,82	0,006	1,141	1,152	0,383	0,754	0,385
1.2. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
3	09:44	23,88	65,05	83,36	68,25	141,50	99,87	8,16	89,75	59,10	0,000	0,866	1,249	0,429	0,641	0,407
1.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
4	09:48	4,88	4,88	14,85	0,00	19,72	19,72	1,71	11,38	11,39	0,000	0,000	0,245	0,095	0,074	0,078
2. Обрыв фазы А																
2.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
5	09:53	51,11	101,62	51,24	152,72	152,85	0,24	0,24	88,10	88,30	0,642	1,290	0,645	0,039	0,578	0,578
2.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
6	09:57	18,81	84,08	57,13	100,44	139,73	46,79	5,38	61,11	82,85	0,114	1,251	0,602	0,317	0,425	0,548
2.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
7	10:01	11,03	18,33	33,55	17,55	49,35	43,41	3,69	26,81	28,69	0,000	0,219	0,551	0,225	0,164	0,180
2.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
8	10:05	3,02	3,02	9,06	0,00	12,07	12,07	1,02	6,96	6,97	0,000	0,000	0,154	0,075	0,041	0,044
3. Обрыв фазы В																
3.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
9	10:09	41,28	43,51	85,68	5,46	129,16	126,91	0,38	76,40	71,42	0,517	0,556	1,072	0,022	0,519	0,473
3.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
10	10:13	23,16	58,61	88,34	47,70	145,20	108,05	5,69	86,91	64,20	0,206	0,645	1,266	0,305	0,597	0,405
3.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
11	10:17	21,69	42,12	79,49	32,13	119,08	99,73	7,70	70,33	58,63	0,000	0,407	1,246	0,390	0,477	0,384
3.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
12	10:21	3,83	3,83	11,74	0,00	15,55	15,55	1,40	8,98	8,98	0,000	0,000	0,200	0,077	0,059	0,061
4. Обрыв фазы С																
4.1. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
13	10:25	78,42	40,14	38,15	118,50	4,86	116,53	0,22	65,61	70,05	0,981	0,508	0,476	0,016	0,437	0,482
4.2. R <sub>A</sub> = ∞, R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = 80 Ом																
14	10:29	30,71	26,29	23,99	56,19	6,28	54,02	7,57	29,11	34,49	0,256	0,618	0,570	0,423	0,151	0,236
4.3. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = ∞, R <sub>C</sub> = 80 Ом																
15	10:33	8,37	8,42	23,82	7,07	31,20	31,93	3,03	18,36	18,53	0,000	0,093	0,414	0,134	0,104	0,121
4.4. R <sub>A</sub> = R <sub>B</sub> = R <sub>C</sub> = ∞																
16	10:37	1,20	1,20	3,67	0,00	4,84	4,84	0,49	2,79	2,79	0,000	0,000	0,063	0,046	0,016	0,017



Таблица 2.14 – Исследование режимов работы опытной электрической сети напряжением 380 В (01.07.2014 г.)

Замеры в ТП в начале ВЛ-380 В (точка 3) – Ресурс-1 (№ 2425).  $R_{3У.П} = 6,37 \text{ Ом}$ .

№ пп	Время	Напряжение, В			Ток, А					
		U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Нормальный режим работы										
1.1. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
2	13:26	237,187	236,369	237,513	39,725	46,894	47,597	2,796	44,679	2,497
1.2. $R_{H.A} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
5	13:35	239,568	231,101	238,644	20,916	44,902	46,888	7,563	37,465	9,215
1.3. $R_{H.A} = R5 = 20 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
8	13:41	242,359	228,270	240,497	9,428	43,831	47,090	10,627	33,333	13,433
1.4. $R_{H.A} = R8 = 96 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
10	13:45	244,275	226,077	241,833	1,041	43,079	47,147	12,840	30,287	16,540
1.5. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
13	13:50	244,515	224,844	241,609	1,304	42,625	46,952	13,388	29,301	17,307
1.6. $R_{H.A} = R_{H.C} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
16	13:57	235,484	233,271	242,674	20,585	45,032	26,870	6,812	30,755	7,944
1.7. $R_{H.A} = R_{H.C} = R4 = 20 \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
18	14:04	234,250	232,151	244,183	14,709	44,341	19,442	8,754	26,076	9,650
1.8. $R_{H.A} = R_{H.C} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
24	14:12	232,439	230,018	250,847	1,185	42,542	0,000	14,562	14,051	13,896
2. Разрыв фазы С в рубильнике после ВЛ-380 В										
2.1. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
27	14:23	225,797	241,277	244,866	37,579	47,088	0,000	11,976	28,058	16,602
2.2. $R_{H.A} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
31	14:30	229,569	234,159	248,627	14,520	44,316	0,000	12,319	19,533	13,725
2.3. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
34	14:36	231,996	229,277	250,167	1,173	42,574	0,000	14,568	14,053	13,901
3. Обрыв нулевого провода в рубильнике после ВЛ-380 В										
3.1. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
40	14:51	239,646	233,079	238,342	0,480	41,703	41,331	4,759	25,717	21,445
3.2. $R_{H.A} = R8 = 96 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
43	14:57	238,902	233,262	238,255	2,332	41,796	41,440	4,649	26,974	20,054
3.3. $R_{H.A} = R7 = 51,2 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
48	15:13	238,655	233,089	237,871	4,705	41,953	41,631	4,518	28,115	18,962
3.4. $R_{H.A} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
54	15:22	237,965	234,786	237,736	17,846	43,041	43,065	3,708	34,127	12,640
3.5. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
56	15:26	236,536	236,021	236,543	39,967	46,624	46,849	2,520	44,402	2,262
3.6. $R_{H.A} = R_{H.B} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
60	15:36	238,798	235,653	236,619	22,898	29,349	40,070	3,437	30,650	6,535
3.7. $R_{H.A} = R_{H.B} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
64	15:44	240,442	235,990	237,019	17,162	21,613	36,479	4,134	24,907	7,560
3.8. $R_{H.A} = R_{H.B} = R7 = 51 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
70	15:55	243,845	235,206	236,173	4,493	6,045	26,785	6,373	12,312	7,921
3.9. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$										
74	16:02	245,404	234,358	235,499	0,698	0,000	22,389	7,624	7,238	7,403
3.10. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$										
78	16:11	238,504	237,733	238,572	0,000	0,000	0,000	0,046	0,000	0,000



## 2.5 Анализ параметров электрической сети при различных режимах работы

### 2.5.1 Нормальный режим работы и изменение несимметрии нагрузок сети

На рисунках 2.1 – 2.6 приведены графики изменения токов и напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителя. Зависимости получены при компьютерном моделировании.

На рисунке 2.1 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %): напряжения нулевой и обратной последовательностей:  $U_0$  возрастает до 0,57 о.е.;  $U_2$  возрастает до 0,09 о.е.; соотношение напряжений  $U_0 / U_2$  меняется в пределах 6,3 – 6,5.

На рисунке 2.2 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %) токи нулевой и обратной последовательностей:  $I_0$  возрастает до 0,266 о.е.;  $I_2$  возрастает до 0,363 о.е.; соотношение токов  $I_0 / I_2$  равно 0,73.

На рисунке 2.3 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %) дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  меняется в пределах 0–0,008 о.е.; дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$  меняется в пределах 0–0,022 о.е.

На рисунке 2.4 видно, что с увеличением несимметрии одновременно в двух фазах (уменьшением нагрузки на фазах В и С от 100 % до 0 %) напряжения нулевой и обратной последовательностей:  $U_0$  возрастает до 0,063 о.е.;  $U_2$  возрастает до 0,007 о.е.; соотношение напряжений  $U_0 / U_2$  меняется в пределах 6,8 – 9.

На рисунке 2.5 видно, что с увеличением несимметрии одновременно в двух фазах (уменьшением нагрузки на фазах В и С от 100 % до 0 %) токи нулевой и обратной последовательностей:  $I_0$  возрастает до 0,298 о.е.;  $I_2$  возрастает до 0,298 о.е.; соотношение токов  $I_0 / I_2$  меняется в пределах 0,77 – 1.

На рисунке 2.6 видно, что с увеличением несимметрии одновременно в двух фазах (уменьшением нагрузки на фазах В и С от 100 % до 0 %): дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  возрастает до 0,09 о.е.; дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$  возрастает до 0,042 о.е.

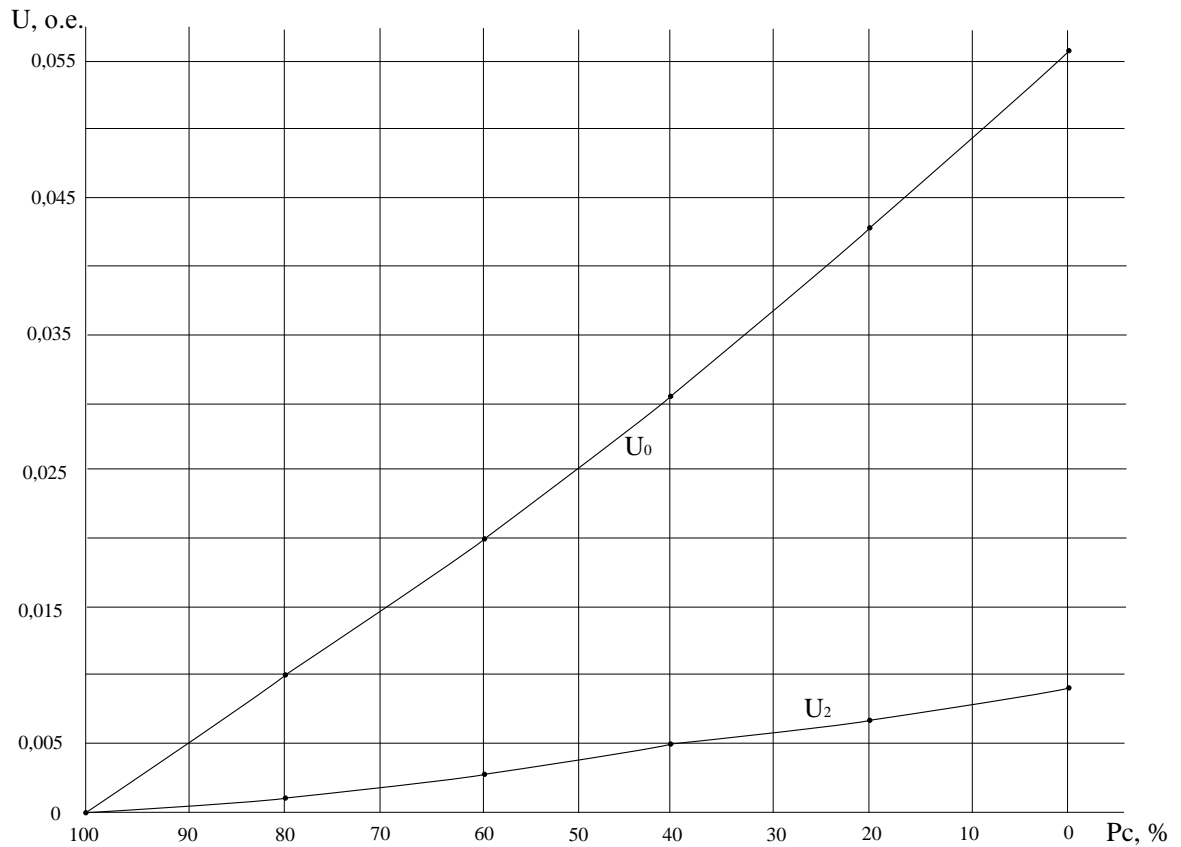


Рисунок 2.1 – Изменение напряжений электрической сети при нормальном режиме её работы в зависимости от нагрузки фазы  $C$ ,  $R_{3У.П} = 30$  Ом

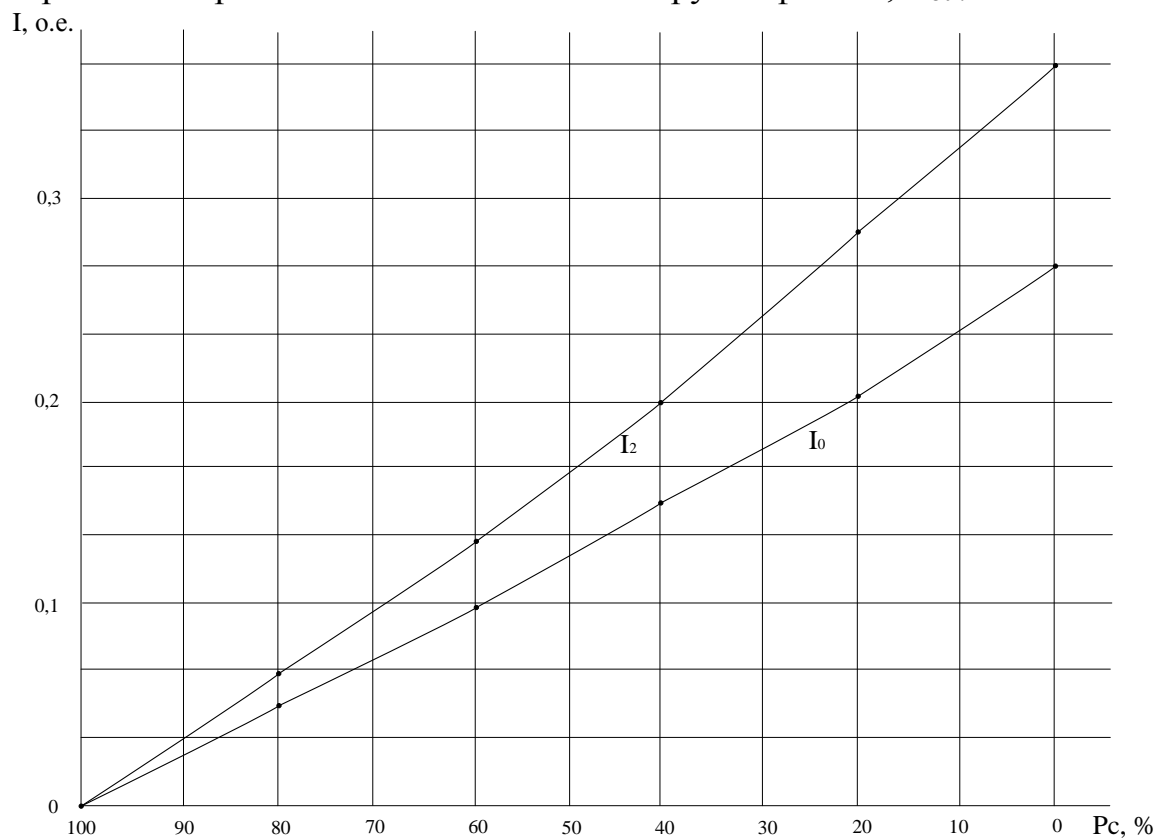


Рисунок 2.2 – Изменение токов электрической сети при нормальном режиме её работы в зависимости от нагрузки фазы  $C$ ,  $R_{3У.П} = 30$  Ом

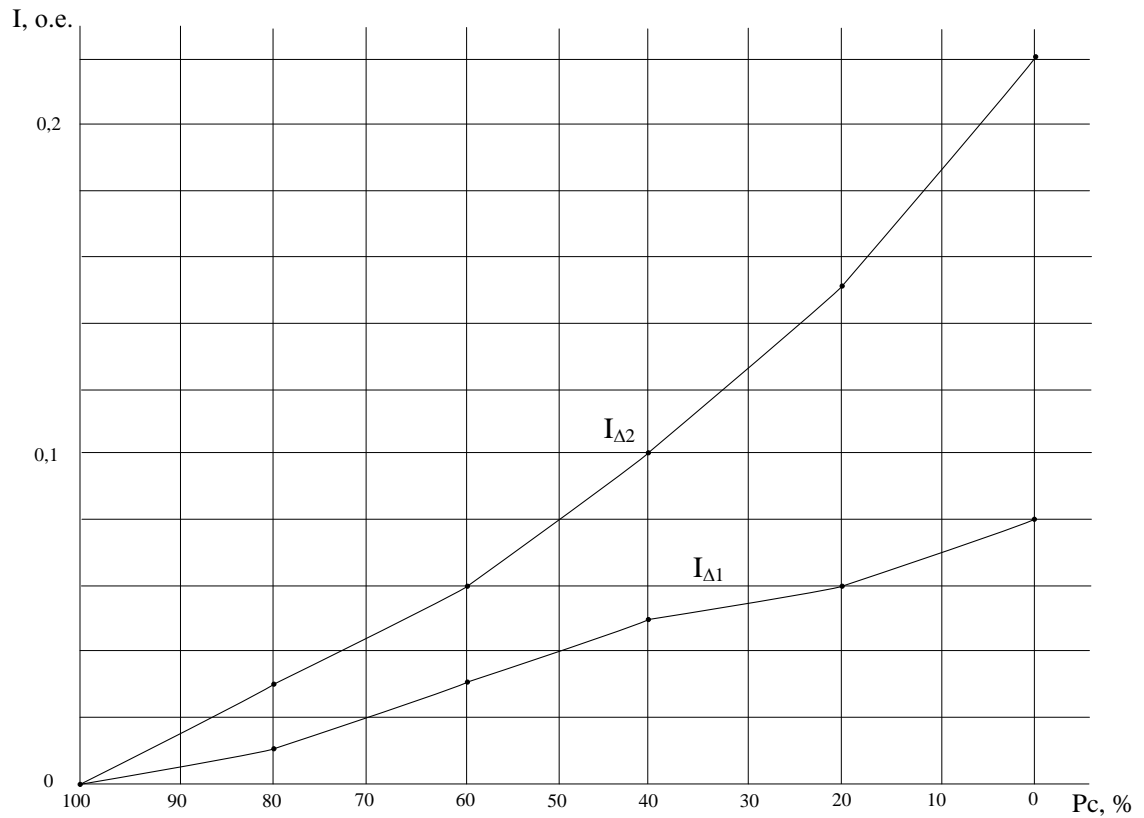


Рисунок 2.3 – Изменение дифференциальных токов электрической сети при нормальном режиме её работы в зависимости от нагрузки фазы  $C$ ,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

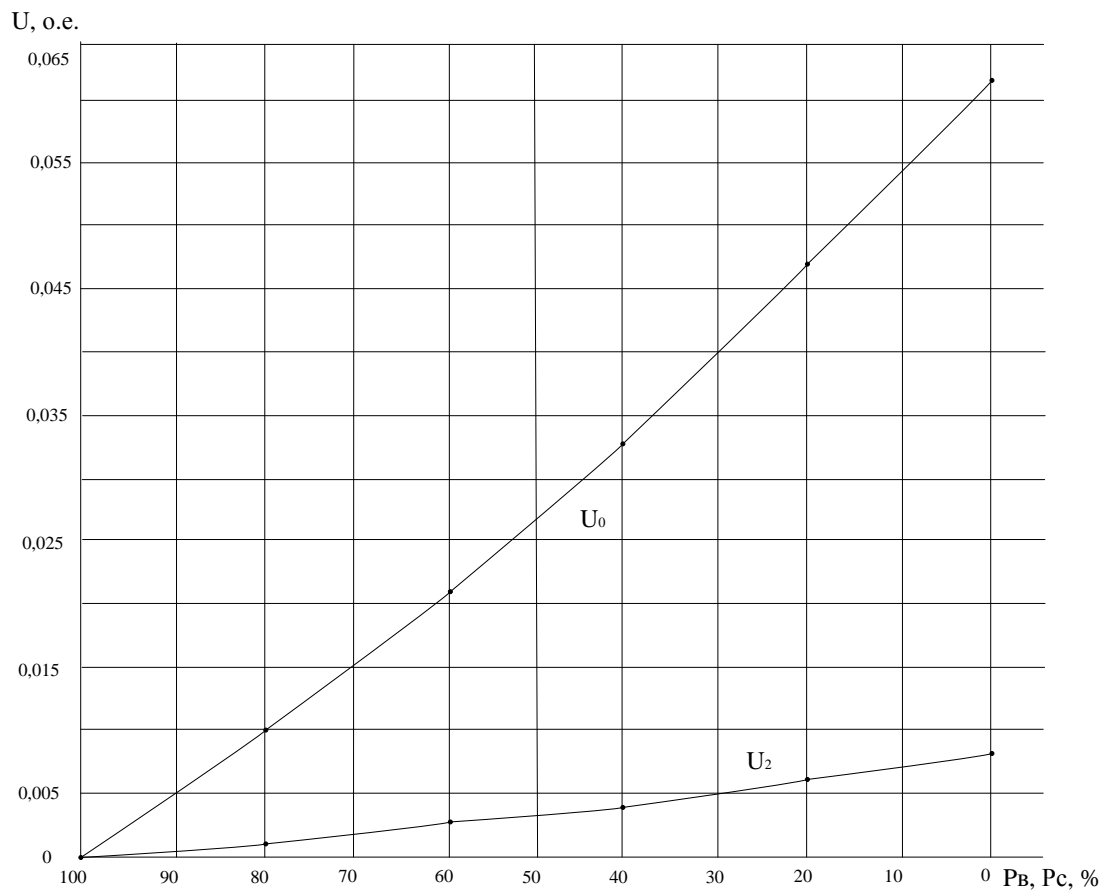


Рисунок 2.4 – Изменение напряжений электрической сети при нормальном режиме её работы в зависимости от нагрузки фаз  $B$  и  $C$ ,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

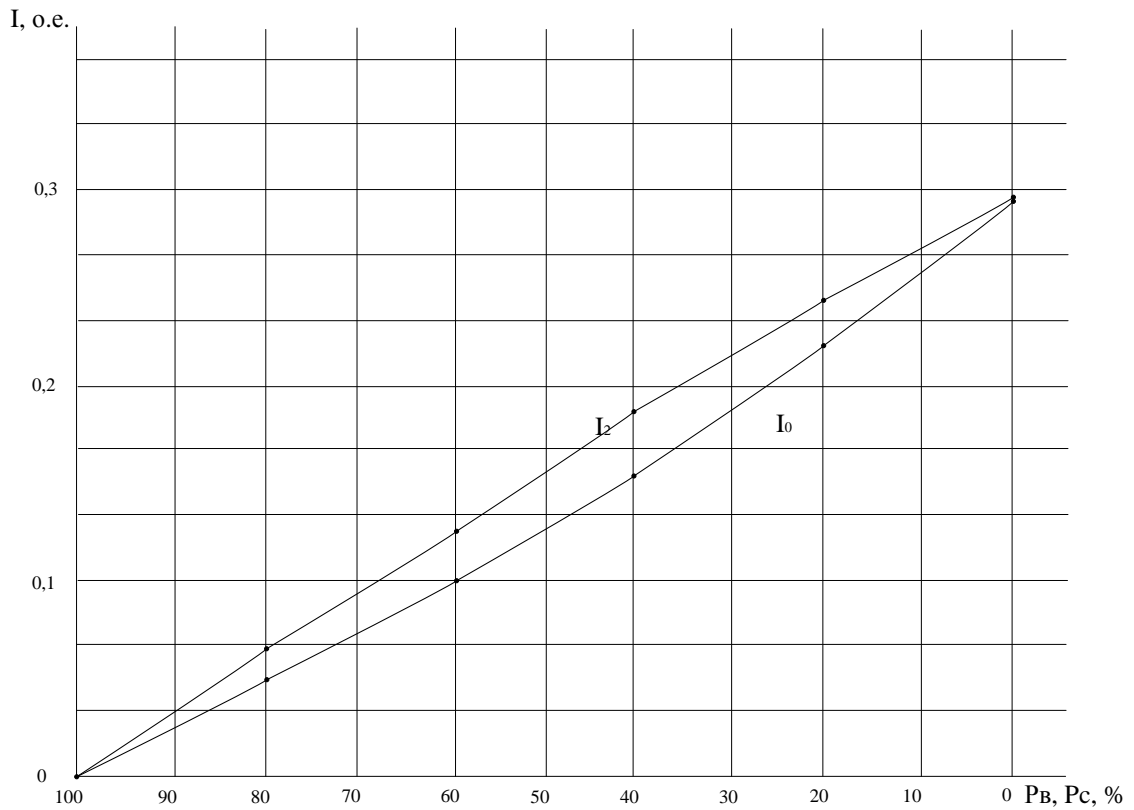


Рисунок 2.5 – Изменение токов электрической сети при нормальном режиме её работы в зависимости от нагрузки фаз В и С,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

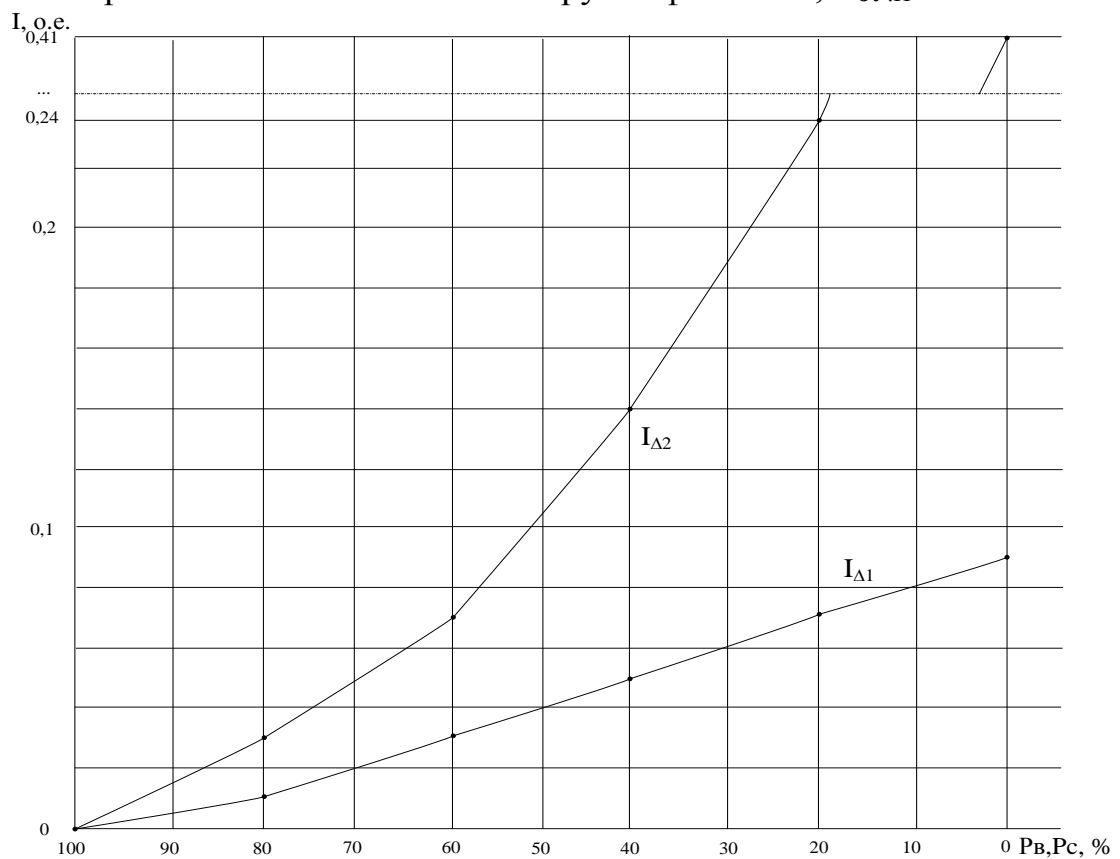


Рисунок 2.6 – Изменение дифференциальных токов электрической сети при нормальном режиме её работы в зависимости от нагрузки фаз В и С,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

### 2.5.2 Обрыв фазного провода и изменение несимметрии нагрузок сети

На рисунках 2.7 – 2.12 приведены графики изменения токов и напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителя. Зависимости получены при компьютерном моделировании.

На рисунке 2.7 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %) напряжения нулевой и обратной последовательностей:  $U_0$  возрастает до 0,063 о.е.;  $U_2$  снижается до 0,07 о.е.; соотношение напряжений  $U_0/U_2$  меняется в пределах 6,4 – 8,7.

На рисунке 2.8 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %) токи нулевой и обратной последовательностей:  $I_0$  возрастает до 0,298 о.е.;  $I_2$  снижается до 0,297 о.е.; соотношение токов  $I_0/I_2$  меняется в пределах 0,7 – 1.

На рисунке 2.9 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %): дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  меняется в пределах 0,009 о.е.; дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$  меняется в пределах 0,89 о.е.

На рисунке 2.10 видно, что с увеличением несимметрии одновременно в двух фазах (уменьшением нагрузки на фазах В и С от 100 % до 0 %) напряжения нулевой и обратной последовательностей:  $U_0$  снижается до 0,001 о.е.;  $U_2$  снижается до 0 о.е.; соотношение напряжений  $U_0/U_2$  меняется в пределах 6,4 – 8,7.

На рисунке 2.11 видно, что с увеличением несимметрии одновременно в двух фазах (уменьшением нагрузки на фазах В и С от 100 % до 0 %) токи нулевой и обратной последовательностей:  $I_0$  снижается до 0,004 о.е.;  $I_2$  снижается до 0,004 о.е.; соотношение токов  $I_0/I_2$  равно 0,019.

На рисунке 2.12 видно, что с увеличением несимметрии одновременно в двух фазах (уменьшением нагрузки на фазах В и С от 100 % до 0 %): дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  падает с 0,807 до 0,011 о.е.; дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$  падает с 0,807 до 0,011 о.е.

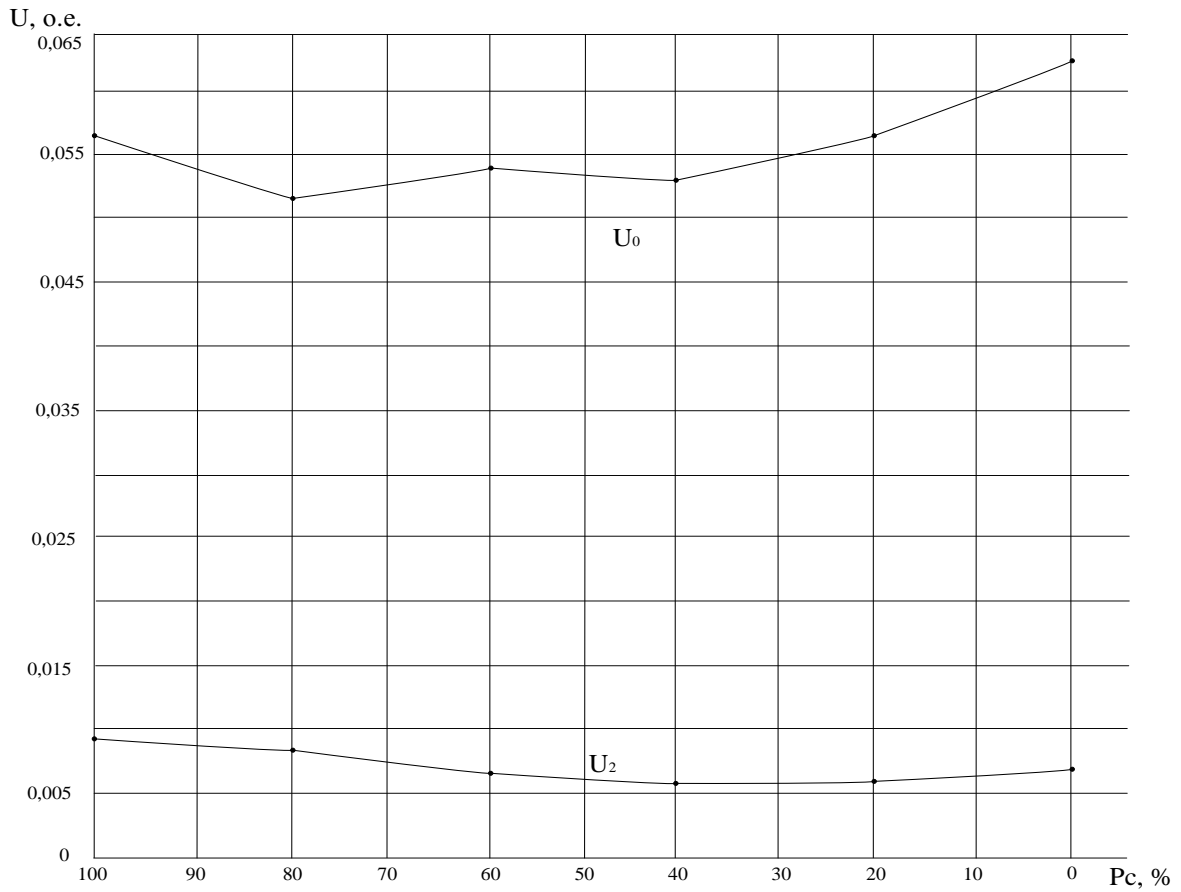


Рисунок 2.7 – Изменение напряжений электрической сети в зависимости от нагрузки фазы  $C$  при обрыве провода фазы  $A$ ,  $R_{з.п} = 30 \text{ Ом}$

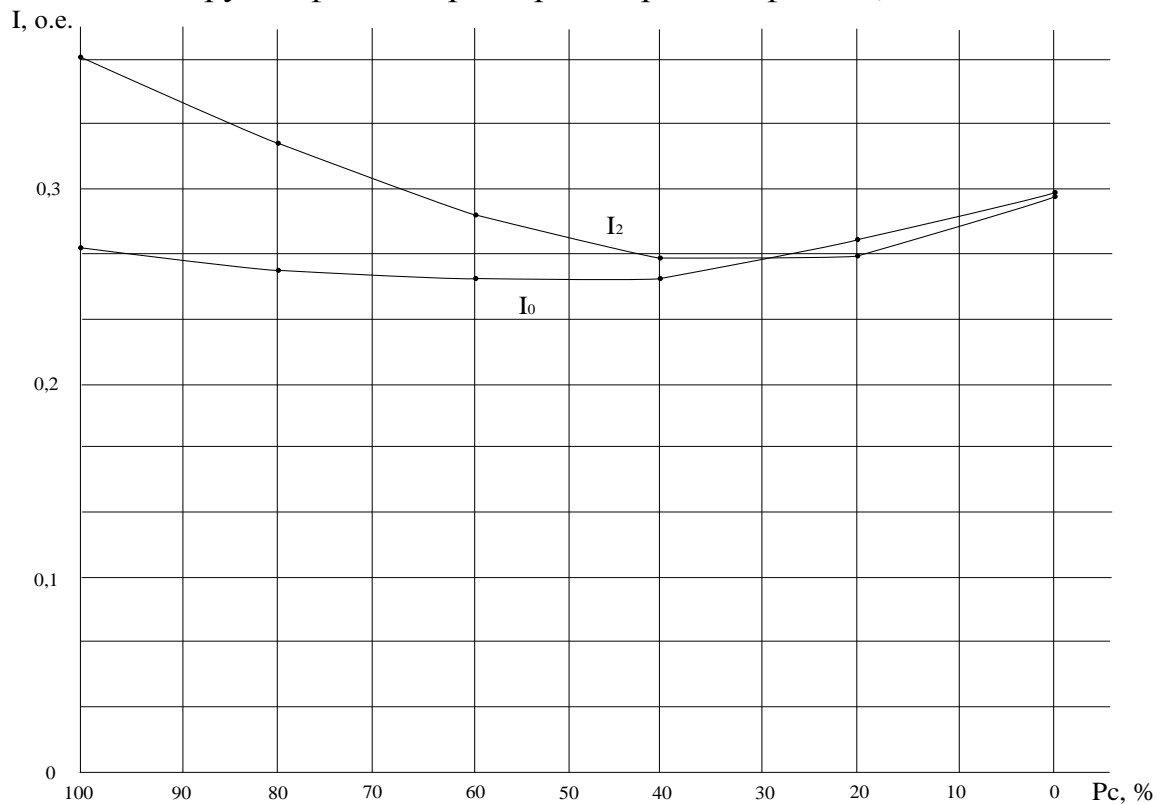


Рисунок 2.8 – Изменение токов электрической сети в зависимости от нагрузки фазы  $C$  при обрыве провода фазы  $A$ ,  $R_{з.п} = 30 \text{ Ом}$

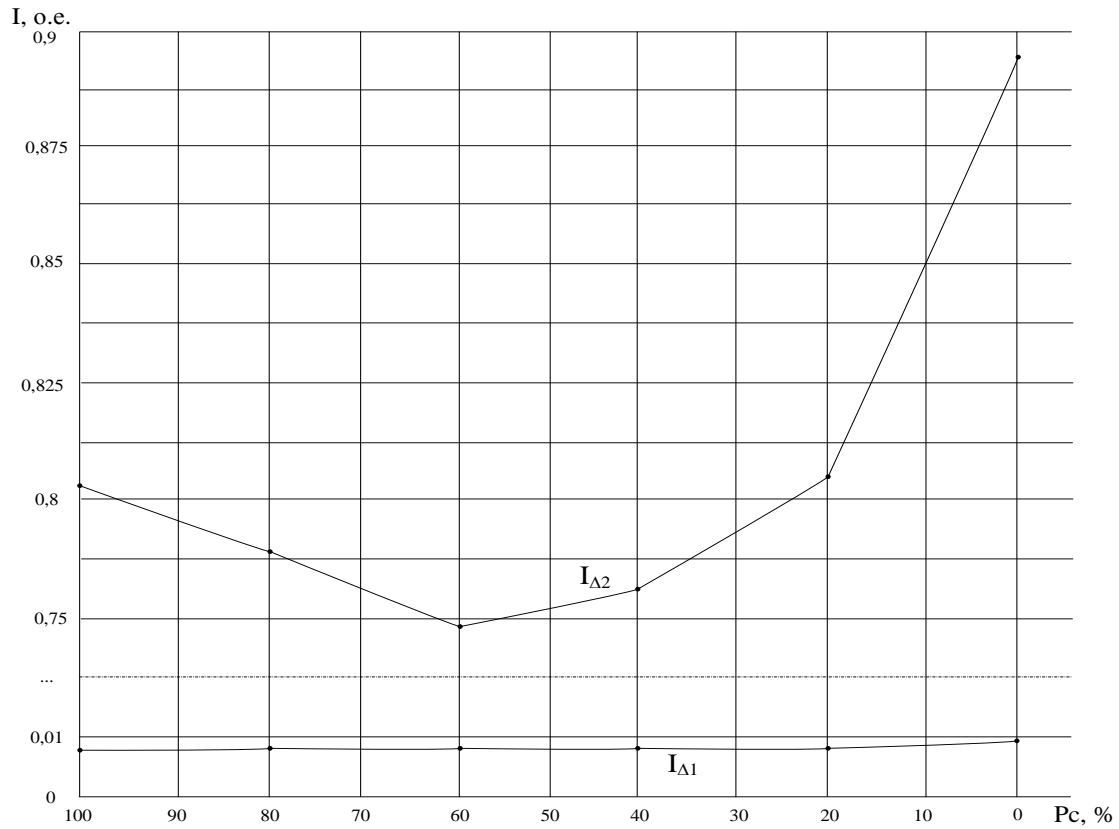


Рисунок 2.9 – Изменение дифференциальных токов электрической сети в зависимости от нагрузки фазы C при обрыве провода фазы A,  $R_{3y.л} = 30 \text{ Ом}$

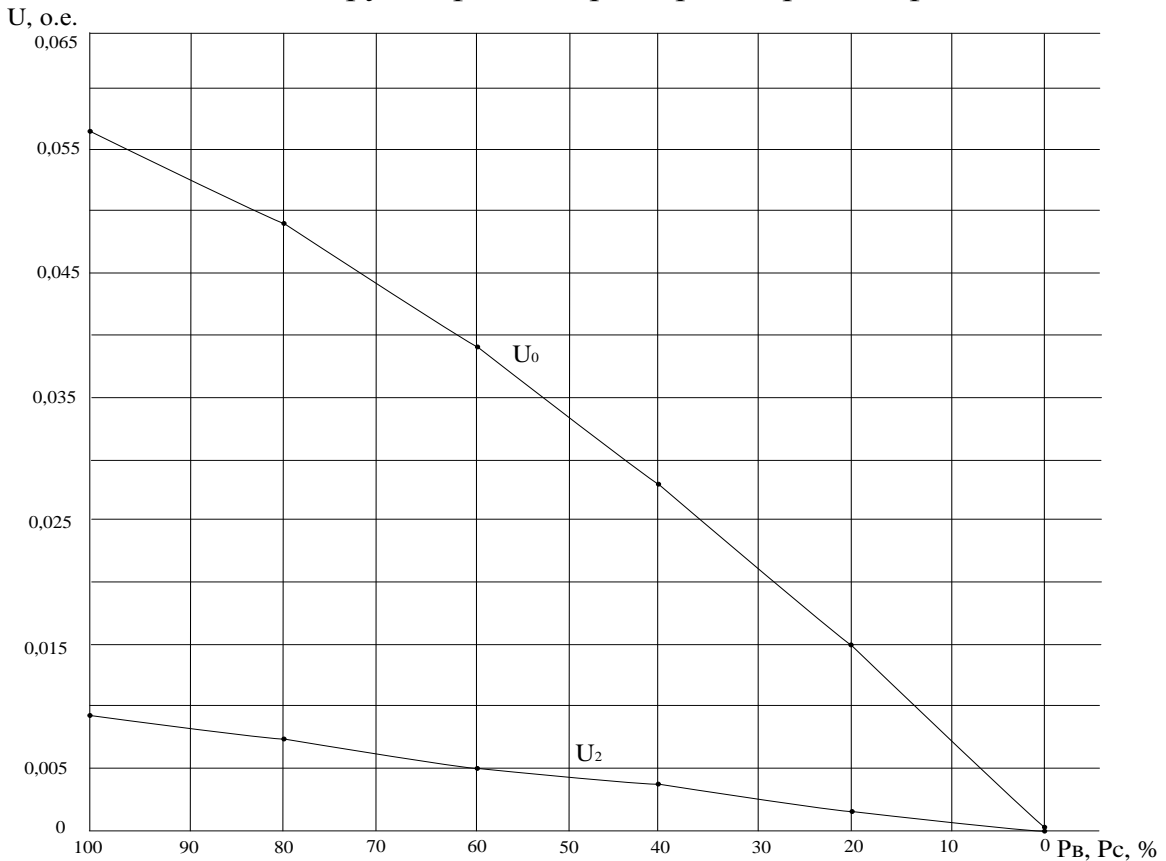


Рисунок 2.10 – Изменение напряжений электрической сети в зависимости от нагрузки фаз B и C при обрыве провода фазы A,  $R_{3y.л} = 30 \text{ Ом}$

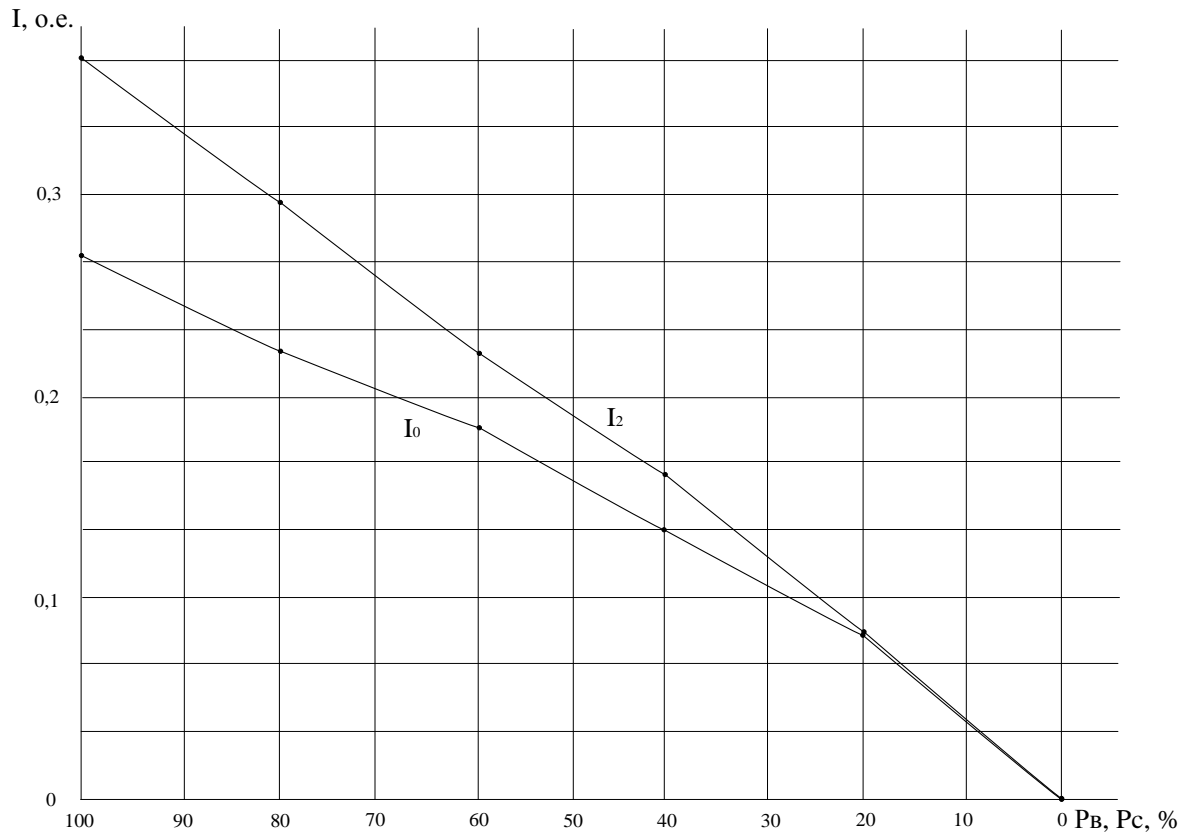


Рисунок 2.11 – Изменение токов электрической сети в зависимости от нагрузки фаз В и С при обрыве провода фазы А,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

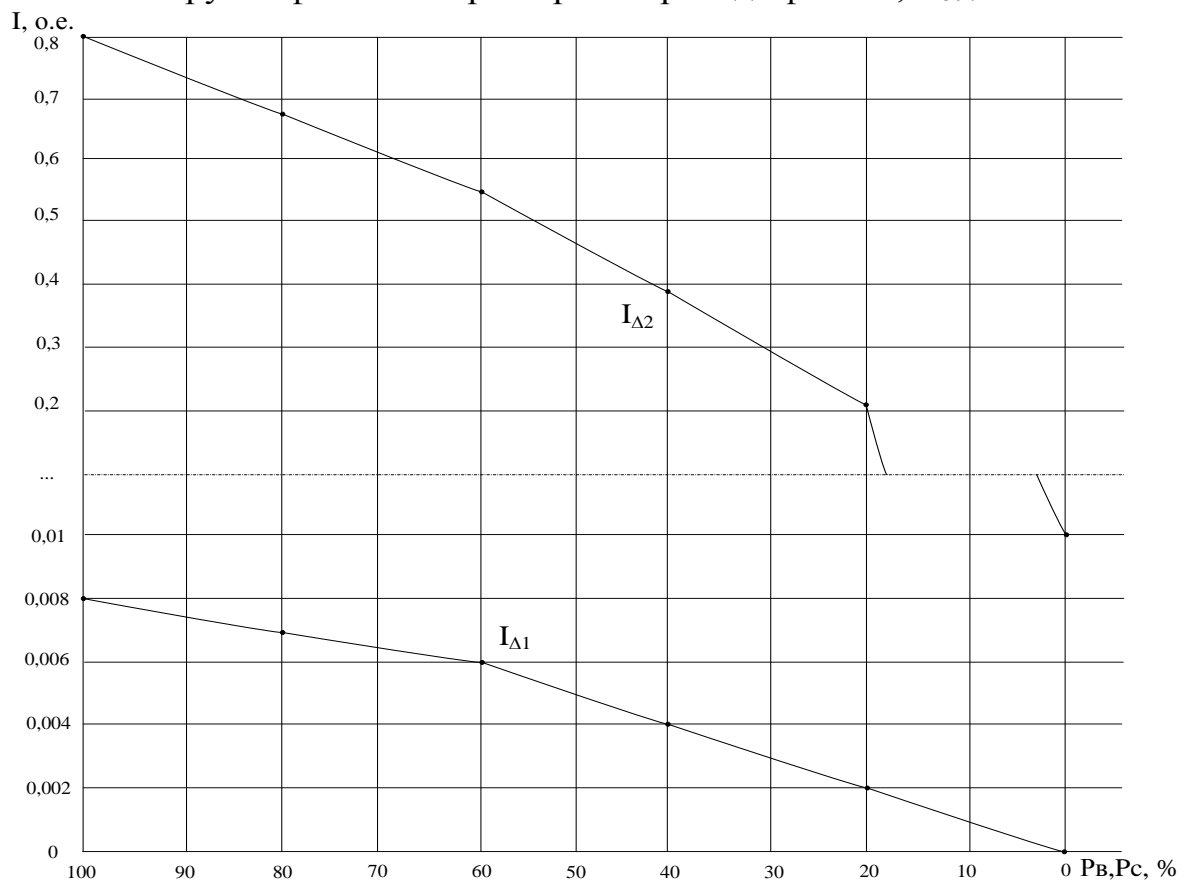


Рисунок 2.12 – Изменение дифференциальных токов электрической сети в зависимости от нагрузки фаз В и С при обрыве провода фазы А,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$



### 2.5.3 Обрыв фазного провода и изменение несимметрии нагрузок сети

На рисунках 2.13 – 2.18 приведены графики изменения напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок. Зависимости получены при компьютерном моделировании.

На рисунке 2.13 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %) напряжения нулевой и обратной последовательностей:  $U_0$  возрастает до 0,002 о.е.;  $U_2$  возрастает до 0,012 о.е.; соотношение напряжений  $U_0 / U_2$  меняется в пределах 0 – 0,161.

На рисунке 2.14 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %) токи нулевой и обратной последовательностей:  $I_0$  возрастает до 0,009 о.е.;  $I_2$  возрастает до 0,492 о.е.; соотношение токов  $I_0 / I_2$  равно 0,079.

На рисунке 2.15 видно, что с увеличением несимметрии (уменьшением нагрузки на фазе С от 100 % до 0 %): дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$  возрастает до 0,022 о.е.; дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$  возрастает до 0,028 о.е.

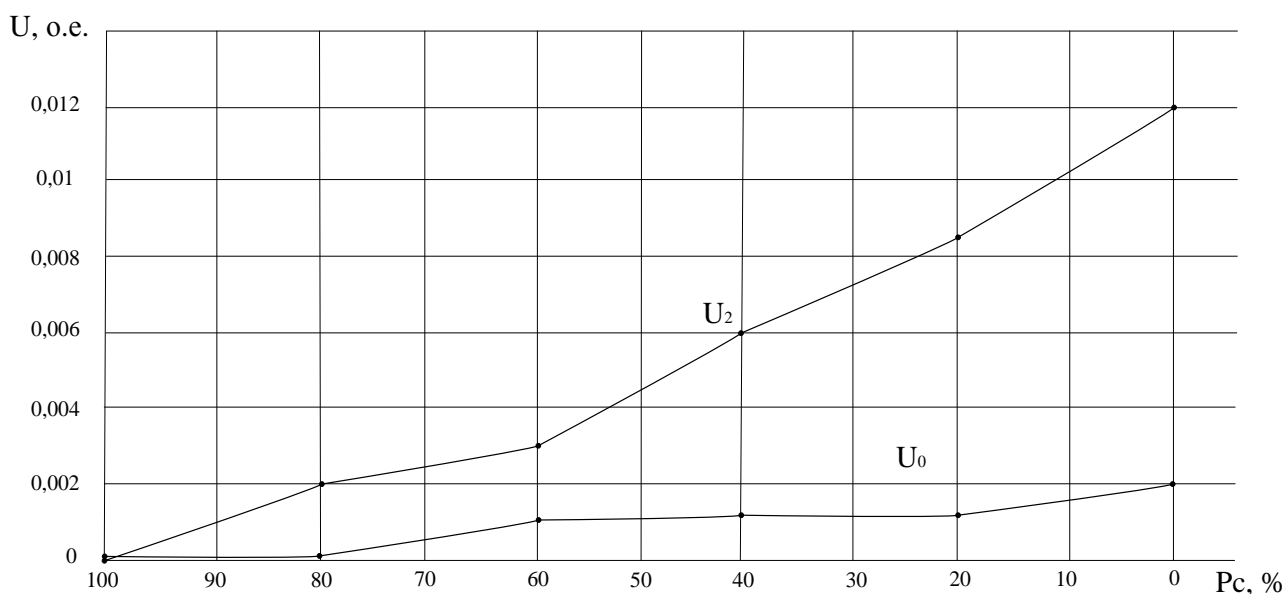


Рисунок 2.13 – Изменение напряжений электрической сети в зависимости от нагрузки фазы С при обрыве нулевого провода,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

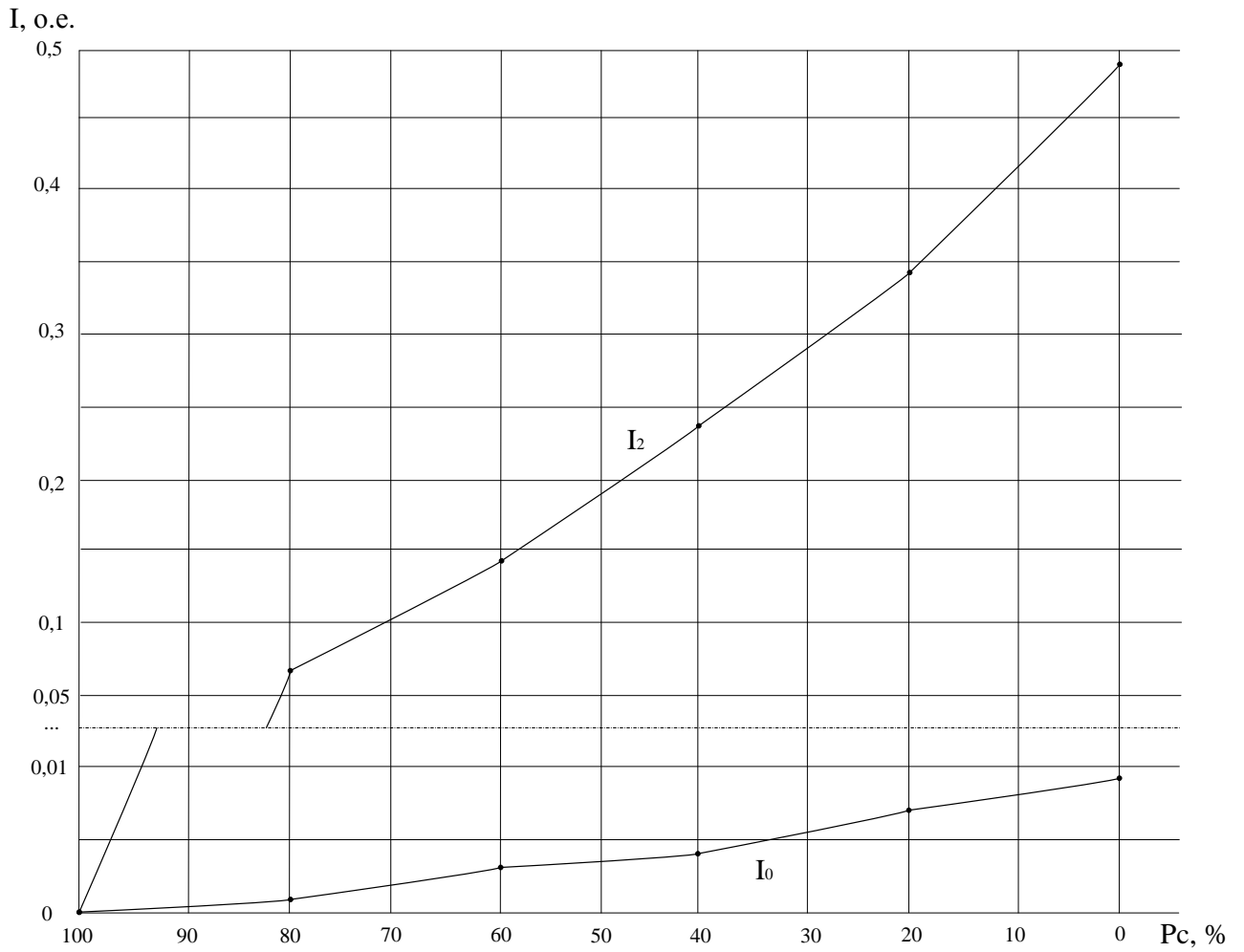


Рисунок 2.14 – Изменение токов электрической сети в зависимости от нагрузки фазы С при обрыве нулевого провода,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

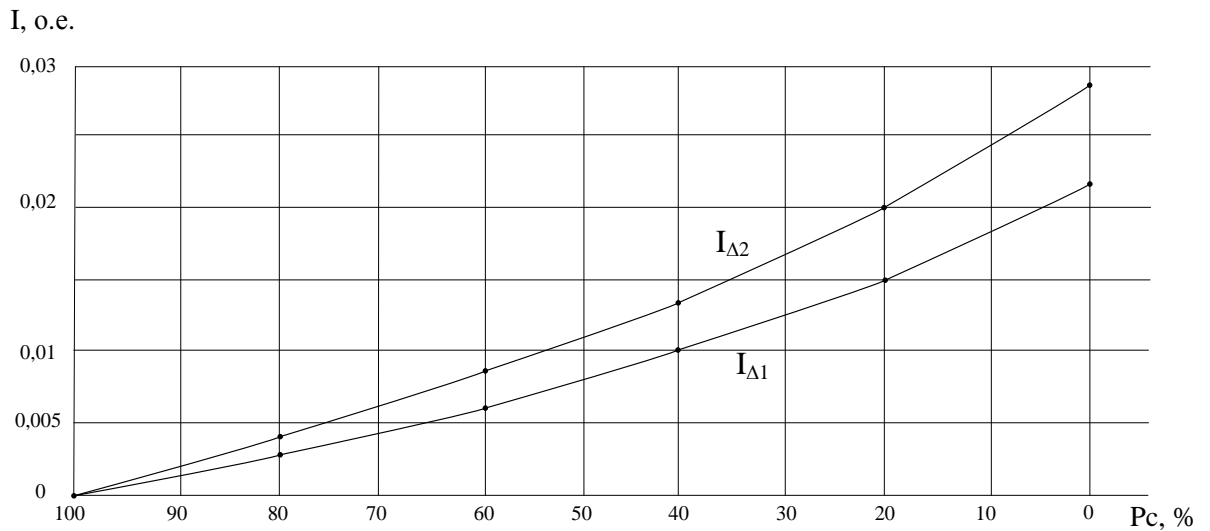


Рисунок 2.15 – Изменение дифференциальных токов электрической сети в зависимости от нагрузки фазы С при обрыве нулевого провода,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

## 2.6 Обобщённые характеристики режимных параметров сети

В предыдущих разделах результаты исследований в таблицах, а также графическая интерпретация этих результатов в виде рисунков. Исходя из этого, можно выделить 7 граничных режимов работы электрической сети:

- 1 Нормальный режим с симметричной нагрузкой;
- 2 Нормальный режим с переменной нагрузкой на фазе С;
- 3 Нормальный режим с переменной нагрузкой на фазах В С;
- 4 Режим обрыва фазы А с переменной нагрузкой на фазе С;
- 5 Режим обрыва фазы А с переменной нагрузкой на фазах В и С;
- 6 Режим обрыва нулевого провода с переменной нагрузкой на фазе С;
- 7 Режим обрыва нулевого провода с переменной нагрузкой на фазах В и С;

На рисунках 2.16 – 2.21 представлены графические изменения режимных параметров ( $U_0$ ;  $U_2$ ;  $I_0$ ;  $I_2$ ;  $I_{\Delta 1}$ ;  $I_{\Delta 2}$ ).

Источник, откуда взяты результаты исследования, помечен соответственно:

Точка – Компьютерная модель, обрыв фазы А;

Крест – Физическая модель, обрыв фазы В;

Треугольник – Физическая модель, обрыв фазы С;

Квадрат – Опытная электрическая сеть, обрыв фазы С.

Так, как результаты компьютерного и физического моделирования, а также экспериментов в опытной электрической сети практически полностью совпадают, это дает нам возможность отображать их на одном графике.

В некоторых исследованиях отсутствовали определенные замеры (например, в опытной электрической сети были произведены замеры только токов  $I_2$  и  $I_0$ , соответственно на других графиках ОЭС – обрыв фазы С – отсутствует).

### Выводы по разделу 2

1 При возникновении продольной несимметрии электрической сети, например, при обрывах нулевого и фазных проводов воздушной линии электропередачи напряжением 380 В меняются напряжения фаз относительно нулевого провода, перераспределяются токи в электрической сети и одновременно появляются симметричные составляющие напряжений и токов обратной и нулевой последовательности.

2 В работе исследованы изменения шести параметров в начале ВЛ-380 В ( $U_0$ ,  $U_2$ ,  $I_0$ ,  $I_2$ ,  $I_{\Delta 1}$ ,  $I_{\Delta 2}$ ) при различных режимах работы ВЛ-380 В (обрывы фазных и нулевого проводов, изменение несимметрии нагрузок потребителей) на компьютерной и физической моделях, сделан анализ экспериментальных данных, проведённых в опытной электрической сети. Получены количественные изменения указанных напряжений и токов, построены соответствующие графики изменения токов и напряжений в зависимости от режима работы сети и нагрузки фаз.

3 Результаты компьютерного и физического моделирования, а также экспериментов в опытной электрической сети качественно и количественно совпали практически полностью.

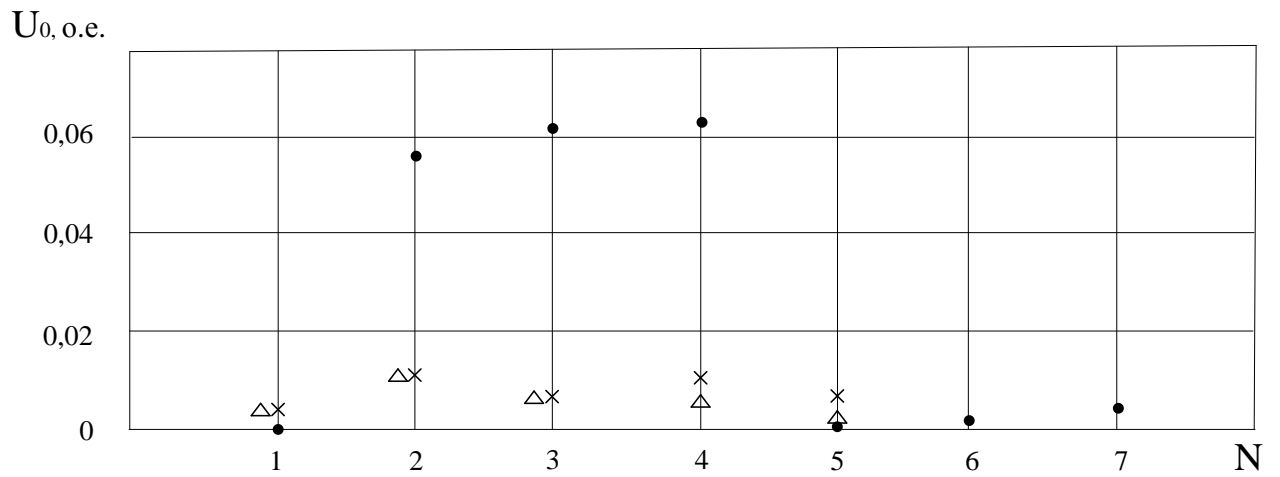


Рисунок 2.16 – Зависимость напряжения нулевой последовательности  $U_0$  от режима работы электрической сети

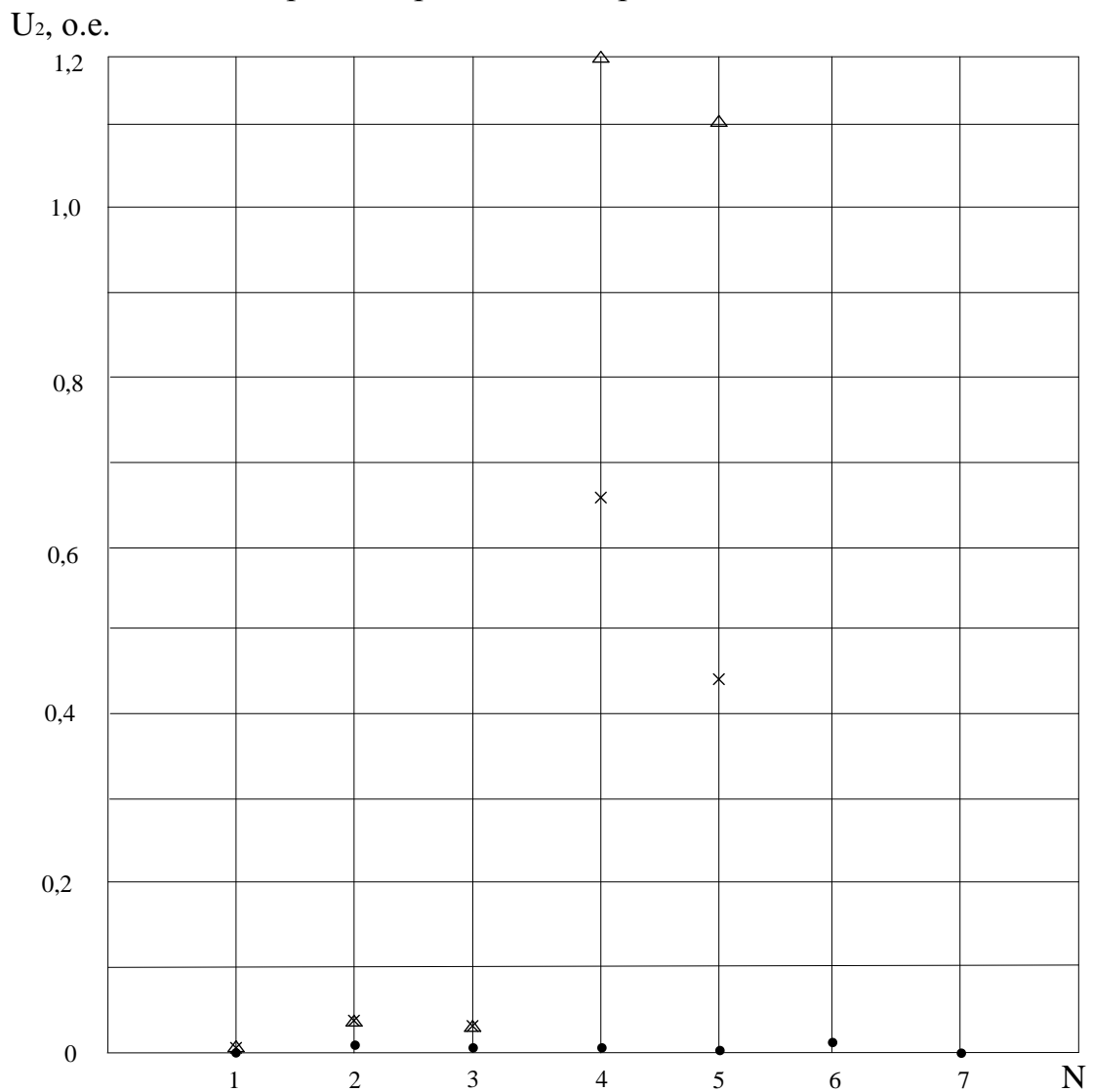


Рисунок 2.17 – Зависимость напряжения обратной последовательности  $U_2$  от режима работы электрической сети

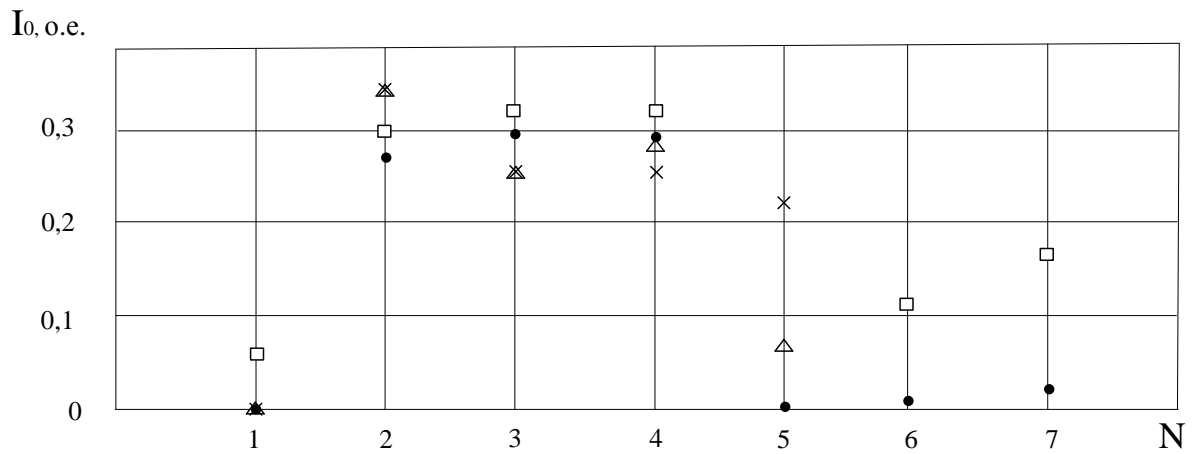


Рисунок 2.18 – Зависимость тока нулевой последовательности  $I_0$  от режима работы электрической сети

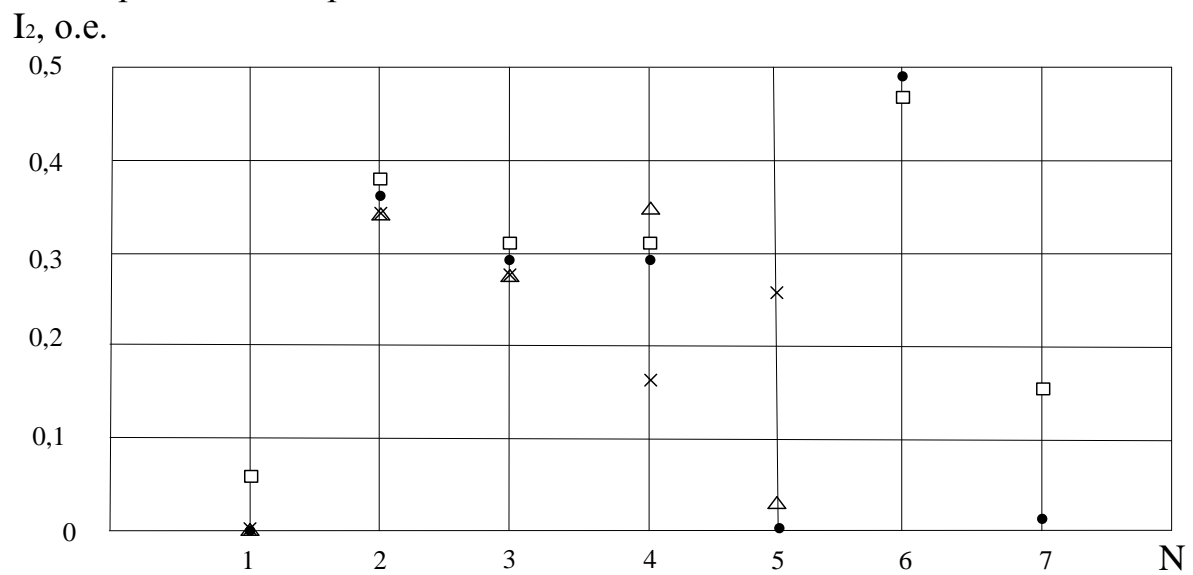


Рисунок 2.19 – Зависимость тока обратной последовательности  $I_2$  от режима работы электрической сети

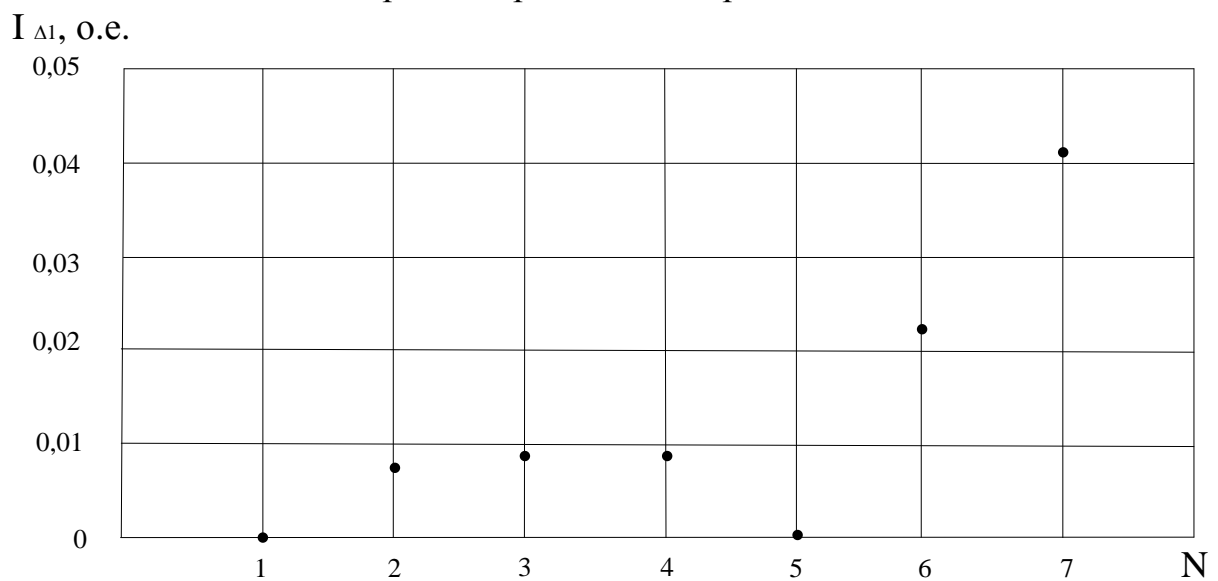


Рисунок 2.20 – Зависимость дифференциального тока  $I_{\Delta 1}$  от режима работы электрической сети

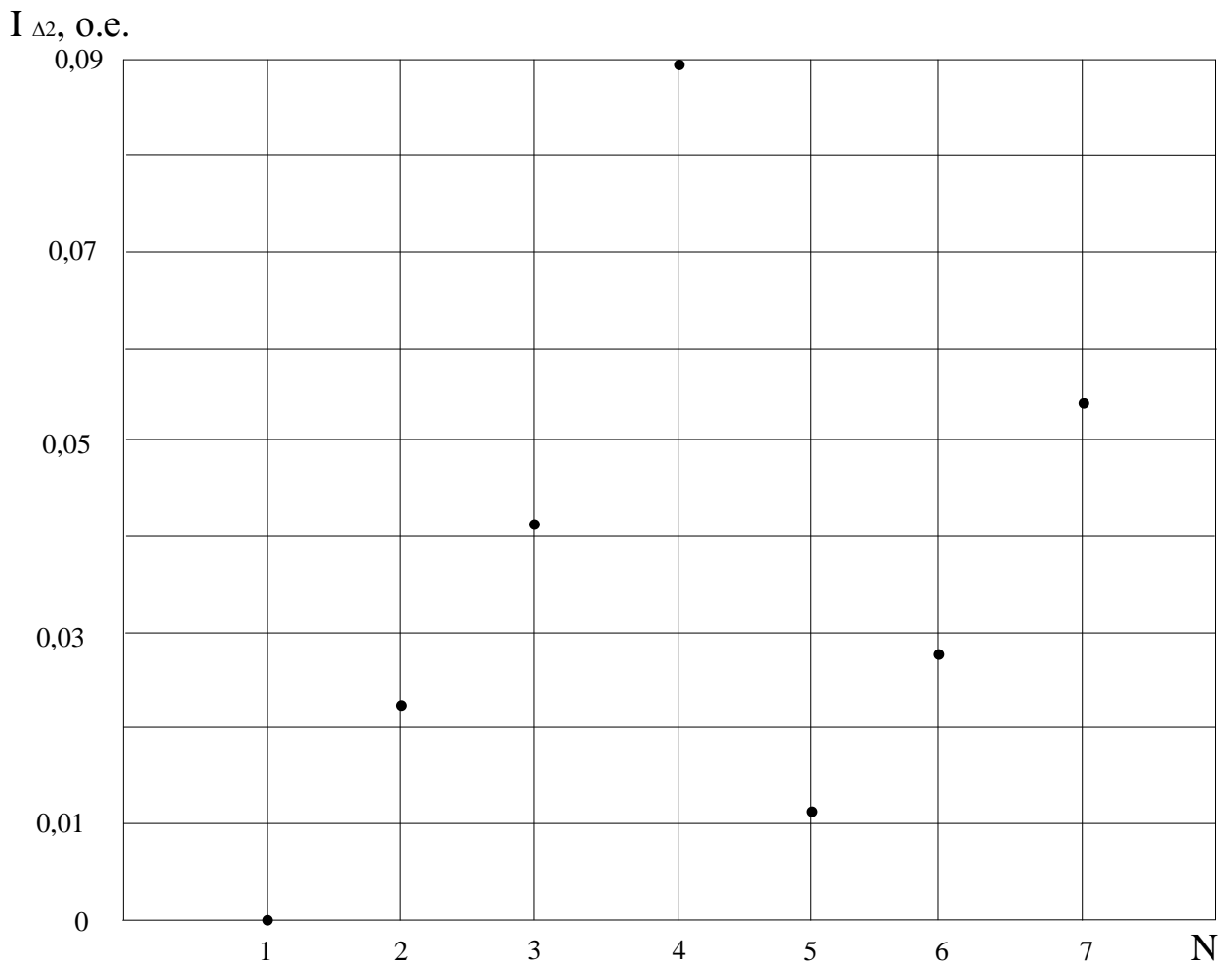


Рисунок 2.21 – Зависимость дифференциального тока  $I_{\Delta 2}$  от режима работы электрической сети

4 Результаты исследований показали:

4.1 Напряжения нулевой и обратной последовательности, полученные в начале ВЛ-380 В, неоднозначно характеризуют и адекватно не отражают состояние ВЛ, в результате не позволяют чётко идентифицировать обрывы фазных и нулевого проводов ВЛ.

4.2 Токи нулевой  $I_0$ , и обратной  $I_2$  последовательности, а также дифференциальные токи  $I_{\Delta 1}$ ,  $I_{\Delta 2}$  позволяют идентифицировать обрывы проводов только при симметричной нагрузке ВЛ-380 В, либо при несимметрии нагрузок, не превышающей 70–80 % (в реальных пределах изменения нагрузок электрической сети). Однако, при возникновении несимметрии фазных нагрузок ВЛ возникают отдельные режимы, которые четко не идентифицируются.

4.3 Для построения защиты, устанавливаемой в начале линии, наиболее информативными являются токи  $I_2$  и  $I_{\Delta 1}$  (векторная сумма фазных токов). Но для окончательного принятия решения какие токи использовать необходимо проведение дополнительных исследований, которые будут проводиться в дальнейшем.

### 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВЛ-380 В ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ

#### 3.1 Обзор методов и средств защит ВЛ-380 В от обрывов фазных проводов

Обрывы проводов и однофазные короткие замыкания в воздушных линиях электрических сетей напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью являются одним из наиболее частых видов повреждений. По разным источникам информации они составляют от 40 до 62 % от общего числа повреждений ВЛ-380 В. Проведём классификацию устройств защиты воздушных линий напряжением 380 В от обрывов нулевого и фазных проводов, а также однофазных коротких замыканий.

При возникновении продольной и поперечной несимметрии электрической сети, например, при обрывах нулевого и фазных проводов воздушной линии электропередачи, а также при однофазных коротких замыканиях меняются напряжения фаз относительно нулевого провода, перераспределяются токи в электрической сети и одновременно появляются симметричные составляющие напряжений и токов обратной и нулевой последовательности [23, 37, 54]. Информация об указанных изменениях может быть использована при построении защит электрической сети от возникающих несимметричных режимов работы.

***Токовые защиты, реагирующие на токи, протекающие по фазным проводам воздушной линии.*** Токовые защиты ВЛ-380 В, построенные с использованием плавких предохранителей и автоматических выключателей, устанавливаемых в начале ВЛ и реагирующих на увеличение токов, протекающих по нулевому и фазным проводам, предназначены для защиты электрической сети от однофазных или многофазных токов короткого замыкания [16, 19]. Но, в связи с быстрым снижением токов короткого замыкания по длине ВЛ, эти защитные аппараты имеют ограниченную зону защиты, не превышающую 250–350 м

Для повышения эффективности этих токовых защит предложено секционировать воздушную линию, т.е. разбивать её на участки, в начале которых следует устанавливать защитные аппараты (плавкие предохранители и автоматические выключатели). Это предложение сформулировано в работах П.И. Спевачова [45, 46, 47, 48], первая из которых опубликована ещё в 1939 г. Эти предложения были использованы в «Методических указаниях по выбору устройств релейной защиты в сетях 0,38–35 кВ сельскохозяйственного назначения», 1976 и 1996 годов, разработанных институтом «Сельэнергопроект» [25, 28] и в пособии [38].

Основная идея секционирования заключается в установке защитного аппарата (плавкого предохранителя или автоматического выключателя) в расщепку проводов ВЛ-0,38 кВ (рисунок 3.1) на расстоянии от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ). Следует отметить, что методики выбора параметров секционирующих плавких предохранителей и автоматических выключателей представлены в [25, 38, 48] ориентированы на значение коэффициента чувствительности  $K_{\text{ч}} = 3$ .

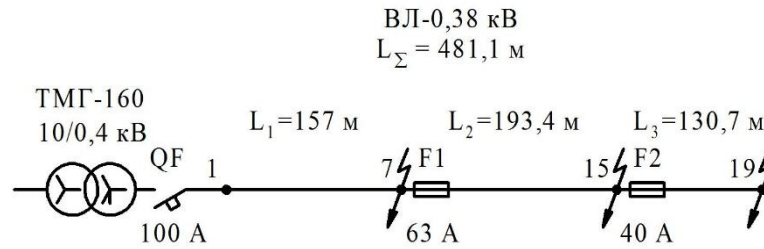


Рисунок 3.1– Пример схемы защиты воздушной линии напряжением 380 В путём её секционирования защитными аппаратами

Следует отметить, что предохранители сейчас широко используются в электрических сетях низкого напряжения. Они работают достаточно надежно и эффективно на тупиковых участках сети, если их число для защиты разных участков при последовательном включении в электрическую цепь не превышает 2–3, и если ток аварийного или ненормального режима по крайней мере в пять – семь раз больше номинального тока плавкой вставки предохранителя. При таких условиях правильно выбранные по своим характеристикам предохранители могут обеспечить избирательное отключение именно поврежденного участка сети.

При обрывах проводов ток поврежденной фазы или нулевого провода становится равным нулю, а токи в оставшихся проводах перераспределяются, но не превышают токов срабатывания плавких предохранителей и автоматических выключателей. Таким образом, эти защитные аппараты принципиально не могут обеспечить защиту ВЛ-380 В от обрывов проводов.

**Защиты, построенные на сравнении двух токов**, протекающих по проводнику, соединяющему заземляющее устройство трансформаторной подстанции и нейтраль вторичной обмотки трансформатора, и нулевому рабочему проводу, или двух токов, протекающих на разных участках нулевого рабочего провода [30, 33]. Известно, что в нормальном режиме работы сети при любой несимметрии нагрузок линии ток, протекающий по нулевому проводу, всегда больше тока, протекающему по заземлению нейтрали трансформатора. При обрыве нулевого провода это соотношение меняется, что и используется для обнаружения аварийной ситуации.

На рисунке 3.2,а приведена схема замещения электрической сети с воздушной линией, а на рисунке 3.2,б – структурная схема устройства контроля непрерывности нулевого провода.

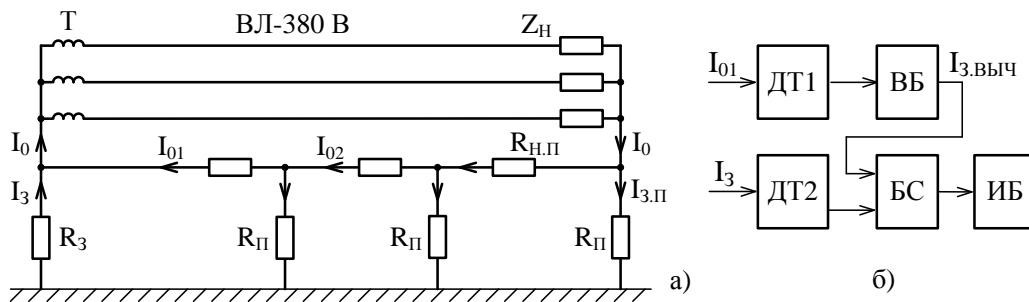


Рисунок 3.2 – Устройство защиты, построенное на сравнении токов электрической сети



Устройство содержит измерительные датчики тока ДТ1 и ДТ2, вычислительный блок ВБ, в котором по значению тока в нулевом проводе в начале линии  $I_{01}$  вычисляется значение тока в заземлении нейтрали питающего трансформатора  $I_{3.выч}$ , блок сравнения БС и исполнительный блок ИБ.

Устройство работает следующим образом. В нормальном режиме работы сети в нулевом проводе в начале линии протекает ток  $I_{01}$ , а в заземлении нейтрали трансформатора протекает ток  $I_3$  (рисунок 3.2,а). По измеренному с помощью датчика ДТ1 значению тока  $I_{01}$  блок ВБ вычисляет расчетное значение тока  $I_{3.выч}$ , которое в блоке БС сравнивается с измеренным током  $I_3$ , полученным с помощью датчика ДТ2. В случае несовпадения расчетного  $I_{3.выч}$  и измеренного значений  $I_3$ , блок БС генерирует сигнал и через исполнительный блок ИБ отключает питающий трансформатор Т.

Кроме того, устройство содержит блок проверки симметрии (на рисунке 3.2 не показан), который предотвращает ложные срабатывания устройства в случае симметричной нагрузки потребителей, когда возможно нарушение соотношения между токами в нулевом проводнике в начале линии и в заземлении нейтрали трансформатора.

Недостатком устройства является малая зона контроля, т.к. оно надёжно работает при длине воздушной линии до 500 м [61]. Кроме того, при отсутствии нагрузки исчезает информация о токах и, следовательно, теряется контроль за состоянием нулевого провода.

***Защиты, реагирующие на изменение напряжений фаз относительно нулевого провода или земли.*** При обрыве фазного провода, когда напряжение на фазе становится ниже уставки (практически равно нулю), формируется логический сигнал, который анализируется и, если необходимо, отключает потребителя в конце линии с указанием поврежденной фазы [4, 10, 11].

Отключение потребителей при повышении или понижении фазных напряжений питающей электрической сети за допустимые пределы могут выполнять современные микропроцессорные счетчики за счет использования внутреннего реле управления нагрузкой РУН [34]. Данная дополнительная функция счетчика может быть использована и для определения обрывов проводов.

Устройство [60], установленное в конце линии и содержащее два реле, подключенные на два линейных напряжения, и одно реле, подключенное между фазным и нулевым проводами, выявляет обрывы фазных и нулевого проводов ВЛ-380 В, по каналу GSM передаёт сигнал в питающую трансформаторную подстанцию, где воздействует на независимый расцепитель автоматического выключателя и отключает ВЛ-380 В с оборванными проводами.

***Защиты, построенные на использовании напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательности.*** При обрыве фазного провода у потребителя появляются токи обратной последовательности, которые можно использовать, например, для защиты электродвигателя [3]. С помощью фильтра токов обратной последовательности выявляют их изменение и при превышении уставки, электродвигатель отключают от сети. Этот вид защиты может быть использован только

для защиты отдельного электроприёмника, питающегося от повреждённой ВЛ. Защиту линии осуществить с помощью него нельзя.

При обрыве фазы возникает несимметрия напряжений, которая может быть обнаружена с помощью фильтра напряжений обратной последовательности [35, 22]. В устройствах защиты [7, 42, 8, 14] фильтр напряжения обратной последовательности выявляет обрыв фазного провода, подаёт команду на включение короткозамыкателя, создающего трёхфазное короткое замыкание в конце линии, которое отключается токовыми защитами, установленными в начале ВЛ-380 В.

Для выявления несимметричных режимов работы электрической сети может быть использована информация о напряжениях фаз относительно нулевого провода (рисунок 3.3) [4, 11, 10]. Устройство, устанавливаемое в конце воздушной линии, содержит преобразователи П переменного напряжения в логический сигнал с уставками минимального напряжения  $0,1 \cdot U_{\phi}$ , логическую схему и исполнительный орган.

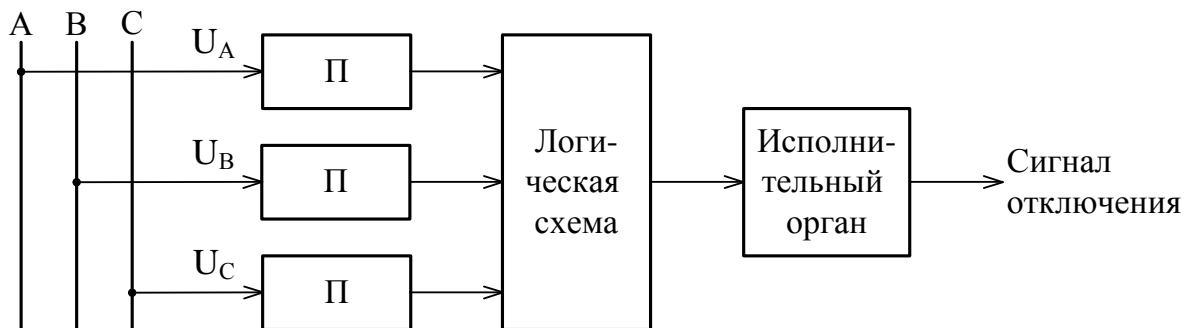


Рисунок 3.3 – Структурная схема устройства защиты, использующая информацию о напряжениях фаз относительно нулевого провода

При обрыве фазного провода напряжение относительно нулевого провода на входе соответствующего преобразователя П становится меньше минимальной уставки  $0,1 \cdot U_{\phi}$  (оно практически равно нулю) и его выходной сигнал меняется с логической единицы до логического нуля. На выходах остальных преобразователей П сохраняются логические единицы. Логическая схема, анализируя сочетания входных сигналов, во-первых, формирует через исполнительный орган сигнал отключения потребителя в конце линии, во-вторых, выдаёт информацию, как о самом факте обрыва фазного провода, так и указании повреждённой фазы.

Отключение потребителей при обрывах фазных проводов могут выполнять современные микропроцессорные счётчики (рисунок 3.4). Счётчики, выполняя свою основную функцию учёта потреблённой электрической энергии, могут контролировать отклонения напряжений на фазах сети относительно нулевого провода и при снижении (или повышении) напряжений ниже (или выше) определённого значения с помощью внутреннего реле управления нагрузкой РУН отключают потребителя от электрической сети [49, 50, 51, 52, 53].

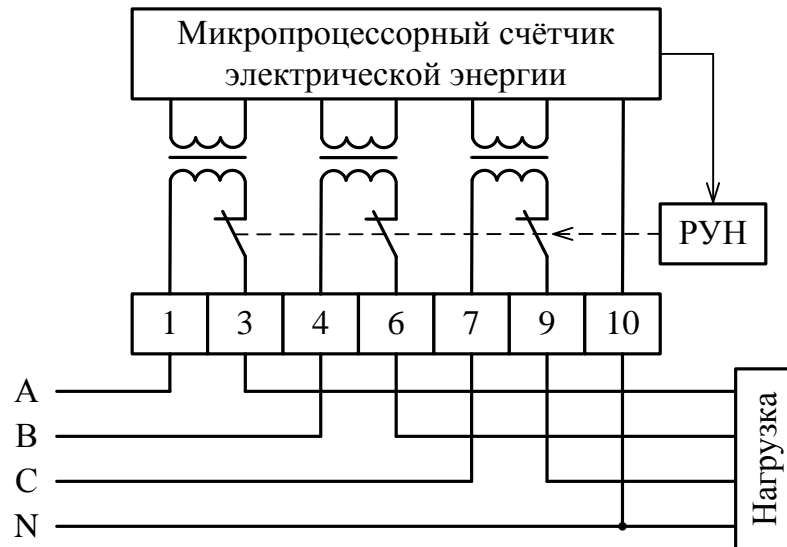


Рисунок 3.4 – Микропроцессорный счётчик

Рассмотренная дополнительная функция микропроцессорного счётчика предназначена для сохранения электроприёмников при выходе параметров напряжения за допустимые значения. Эта же функция может быть использована и для определения обрывов фазных проводов.

**Защиты, построенные на использовании дифференциальных токов.** Для выявления повреждений электрической сети напряжением 380 В широко используют дифференциальные токи, получаемые в результате векторного суммирования различных сочетаний токов четырёхпроводной и пятипроводной электрической сети.

1 Векторная сумма трёх фазных токов четырёхпроводной воздушной линии представляет дифференциальный ток, который при отсутствии сопротивлений повторных заземлений нулевого провода и сопротивления заземляющего устройства у потребителя равен току, протекающему по нулевому проводу, равному току нулевой последовательности, возникающему в трёхфазной системе относительно нулевого провода.

При симметричной нагрузке воздушной линии дифференциальный ток и ток в нулевом проводе равны нулю, а при неравенстве однофазных нагрузок могут достигать половины максимального фазного тока нагрузки ВЛ.

При возникновении обрыва фазного провода ВЛ существенно изменяется распределение токов в электрической сети, в частности, ток нагрузки повреждённой фазы становится равным нулю. При симметричной нагрузке и отсутствии повторных заземлений нулевого провода дифференциальный ток ВЛ будет равен току фазы, в которой произошёл обрыв провода.

При однофазном коротком замыкании на нулевой провод характер распределения токов в электрической сети существенно не меняется, т. к. сопротивление току однофазного короткого замыкания соответствует мощной однофазной нагрузке. Следовательно, ток однофазного короткого замыкания появляется в токе повреждённой фазы и дифференциальном токе ВЛ.

Наличие повторных заземлений нулевого провода ВЛ и заземляющих устройств у потребителей обуславливает стекание с нулевого провода ВЛ и создаёт небаланс

токов для трёхфазной четырёхпроводной воздушной линии. От несимметрии однофазных нагрузок и небаланса токов должны быть отстроены защиты ВЛ от ОКЗ. Уставку по току предлагается принимать равной 70 % расчётного тока одной фазы. Данный дифференциальный ток используется в ряде устройств защиты [1, 2, 16, 57, 58].

2 Векторная сумма четырёх токов четырёхпроводной воздушной линии представляет дифференциальный ток, который при отсутствии сопротивлений повторных заземлителей и сопротивления заземляющего устройства у потребителя, равен току, протекающему на участке схемы между заземляющим устройством ТП и точкой соединения нулевого провода с нейтралью трансформатора. Этот дифференциальный ток используется в устройствах защитного отключения (УЗО), в частности в [36], и может быть использован в качестве информации для выявления однофазного замыкания на землю, например, при обрыве и падении на землю фазного провода, а также каких-либо утечек изоляции с фаз на землю, например, при загрязнении изоляторов ВЛ.

На рисунке 3.5, а приведена схема устройства защитного отключения [24, 31]. Устройство содержит автоматический выключатель QF, управляемый блоком управления БУ, срабатывающим от тока, поступающего с вторичной обмотки дифференциального трансформатора тока ДТА. Трансформатор ДТА выполнен в виде тороидального сердечника, сквозь окно которого проходят фазные (А, В, С) и нулевой рабочий (N) провода – они являются первичной обмоткой дифференциального трансформатора тока ДТА.

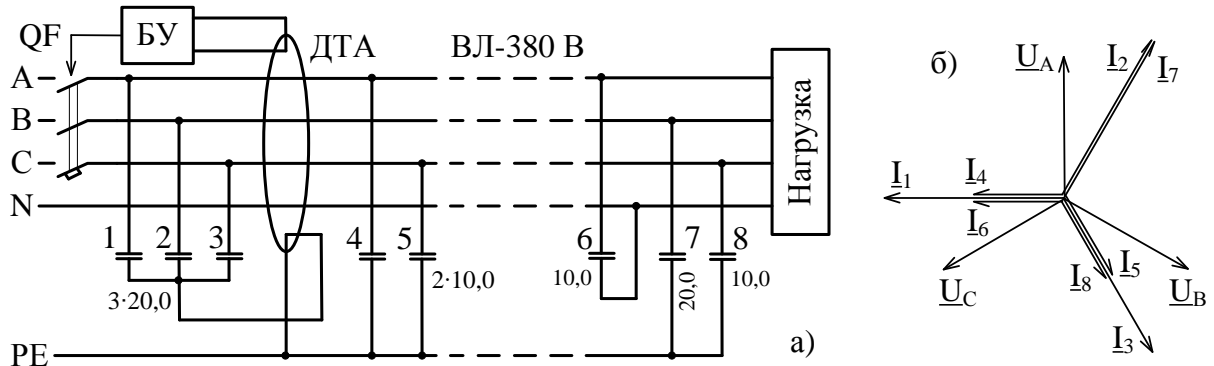


Рисунок 3.5 – Схема устройства защитного отключения

Для обеспечения функционирования устройства использованы восемь конденсаторов, четыре из которых 1, 2, 3 и 7 имеют ёмкость 20 мкФ, а четыре 4, 5, 6 и 8 – ёмкость 10 мкФ. Три конденсатора 1, 2, 3 установлены в начале линии и подключены одними выводами к фазам А, В, С до дифференциального трансформатора тока ДТА (считая по ходу движения энергии), а вторыми выводами – к общему проводу, проходящему через окно дифференциального трансформатора тока ДТА в обратном направлении (считая по ходу движения энергии) и присоединенному к нулевому защитному проводнику РЕ. Два конденсатора 4 и 5 установлены также в начале линии сразу за дифференциальным трансформатором ДТА и подключены между фазами А, С и нулевым защитным проводником РЕ. Три конденсатора уста-

новлены в конце линии: конденсатор 6 подключен между фазой А и нулевым проводом N, конденсаторы 7 и 8 подключены соответственно между фазами В, С и нулевым защитным проводником РЕ.

Такая расстановка конденсаторов с определённой ёмкостью создаёт две геометрические суммы токов, которые формируются до дифференциального трансформатора тока ДТА и после него (рисунок 3.5,б)

$$\begin{aligned}\Sigma_1 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \\ \Sigma_2 &= \dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6 + \dot{I}_7 + \dot{I}_8 = 0.\end{aligned}\tag{3.1}$$

В нормальном режиме работы электрической сети эти суммы равны нулю, обеспечивая отсутствие дифференциального тока в трансформаторе ДТА.

При обрывах фазных проводов линии становятся равными нулю соответствующие токи. Например, при обрыве провода фазы А становятся равными нулю токи  $\dot{I}_4$  и  $\dot{I}_6$ , сумма токов  $\Sigma_2$  и, соответственно, дифференциальный ток трансформатора ДТА будут отличаться от нуля, что вызовет отключение автоматического выключателя QF. Аналогично устройство защитного отключения будет работать при обрывах:

- фазы В ток  $\dot{I}_7 = 0$ ;
- фазы С токи  $\dot{I}_5 = 0$  и  $\dot{I}_8 = 0$ ;
- нулевого провода N ток  $\dot{I}_6 = 0$ ;

Если в электрической сети по каким-либо причинам возникнет несимметрия напряжений, то небалансы токов возникают как в группе из трёх трансформаторов 1, 2, 3, так и в группе из пяти конденсаторов 4, 5, 6, 7, 8, благодаря чему дифференциальный ток трансформатора ДТА останется равным нулю и отключение сети не последует.

Принципиальными недостатками устройства являются, во-первых, оно может быть применено только в пятипроводной электрической сети – современные сельские сети выполняются, как правило, четырёхпроводными с объединёнными нулевыми рабочим и защитным проводниками, во-вторых, оно не может быть применено в воздушных линиях с повторными заземлителями нулевого провода.

3 Для выявления обрывов фазных и нулевого проводов может быть использовано измерение дифференциальных токов в пятипроводной электрической сети напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью [24, 31]. Данное устройство предполагает использование восьми конденсаторов, включённых в разных точках электрической сети, и измерение дифференциального тока (векторной суммы токов, протекающих по этим восьми конденсаторам). В результате можно выявлять различные варианты обрывов проводов электрической сети. Однако этот способ реализуем только в пятипроводной электрической сети с разделёнными нулевым рабочим проводом N и нулевым защитным проводником РЕ, т. е. в сети с применением системы заземления TN–S. Реально все воздушные линии напряжением 380 В работают с совмещённым PEN-проводом, т. е. в сети с применением системы заземления TN–C.

Пример защиты для сетей с совмещенным PEN-проводом приведен на рисунке 3.6. Защита основана на сравнении фаз токов, которые протекают при замыкании на землю в начале линий сети, с фазой тока в заземляющем нейтраль силового трансформатора проводе. Токи измеряются с помощью трансформаторов ТТН, ТТНП1, ТТНП2. Трансформаторы тока нулевой последовательности (дифференциальные трансформаторы тока) ТТНП охватывают все 4 провода линии [19].

При однофазном замыкании на землю ток  $I_{033}$ , имеющий направление от шин ТП в линию, проходит по фазе поврежденной линии, месту повреждения и разветвляется по имеющимся путям. Основная часть тока  $I'_{033}$  протекает по земле и возвращается в сеть через сопротивление заземляющего устройства ТП  $R_{3у.ТП}$  в нейтраль силового трансформатора. Часть тока  $I_{033}$  через сопротивления повторных заземлителей  $R_{П}$  «отсасываются» в нулевые провода поврежденной и неповрежденной линий – токи отсоса  $I_{отс.033}$ . При этом токи  $I_{отс.033}$ , возвращающиеся в сеть через нулевые провода находятся в противофазе с токами  $I_{033}$  и  $I'_{033}$ .

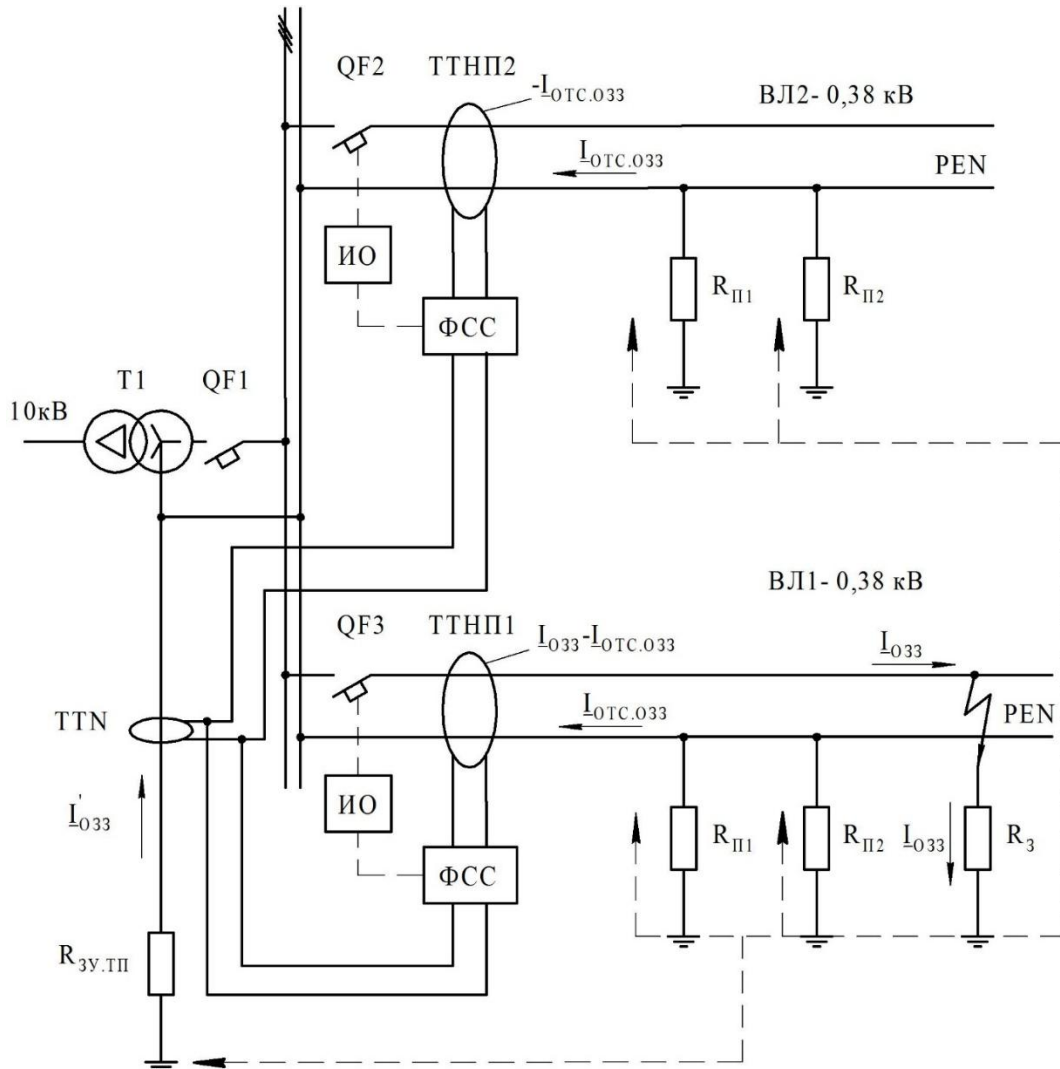


Рисунок 3.6 – Схема токовой фазосравнивающей защиты

Трансформатор тока поврежденной линии ТТНП1 измеряет разницу между полным током замыкания  $I_{033}$  и током отсоса замыкания  $I_{отс.033}$

$$I_{\text{ТТНП1}} = I_{\text{ОЗЗ}} - I_{\text{ОТС.ОЗЗ}}. \quad (3.2)$$

Трансформатор тока ТТНП2 измеряет только ток отсоса своей неповреждённой линии  $I_{\text{ОТС.ОЗЗ}}$

$$I_{\text{ТТНП2}} = - I_{\text{ОТС.ОЗЗ}}. \quad (3.3)$$

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

Сравнивая с помощью фазосравнивающей схем ФСС попарно фазы токов

$$I'_{\text{ОЗЗ}} \text{ и } I_{\text{ТТНП2}}, \quad I'_{\text{ОЗЗ}} \text{ и } I_{\text{ТТНП1}} \quad (3.4)$$

можно определить повреждённую линию и обеспечить селективное действие защиты.

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

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

**Защиты, построенные на использовании наложенных токов.** Для защиты ВЛ-380 В от обрыва фазного провода может быть использовано устройство, основанное на применении источника оперативного тока, устанавливаемого в конце ВЛ и состоящего из трёх цепочек «диод-резистор», и трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП), устанавливаемого в начале ВЛ для выявления оперативного тока [9, 12, 13, 44]. При нормальном режиме работы импульсные сигналы, поступающие с RD-цепочек симметричны и сигнал на выходе ТТНП равен нулю, а при обрыве фазного провода симметрия импульсных сигналов нарушается, что выявляется с помощью ТТНП и обеспечивается срабатывание устройства защиты.

Одним из вариантов контроля целостности нулевого провода четырёхпроводной электрической сети является введение тока непромышленной частоты [6] или постоянного тока [5] в цепь нулевого провода, которые затем замыкаются по фазам электрической сети. При обрыве нулевого провода нарушается цепь прохождения этих токов по указанному контуру, что приводит к отключению автоматического выключателя, обесточивающего ВЛ.

Для выявления обрыва нулевого провода может быть использовано пропускание высокочастотных импульсов через нулевой провод и совокупность повторных заземлителей защищаемых линий [32].

На рисунке 3.7 показана структурная схема устройства постоянного контроля параметров нулевого провода для двух отходящих от трансформаторной подстанции линий, где обозначено: Т – силовой питающий трансформатор; QF1 и QF2 – автоматические выключатели отходящих от подстанции линий ВЛ1 и ВЛ2, от ко-

торых питается нагрузка;  $R_3$  – сопротивление заземляющего устройства подстанции;  $R_{\Pi}$  – сопротивления повторных заземлителей нулевого провода ВЛ-380 В; ГИ1 и ГИ2 – генераторы высокочастотных импульсов, устанавливаемые в конце каждой линии и имеющие свою частоту; БПВИ – блок приёма высокочастотных импульсов.

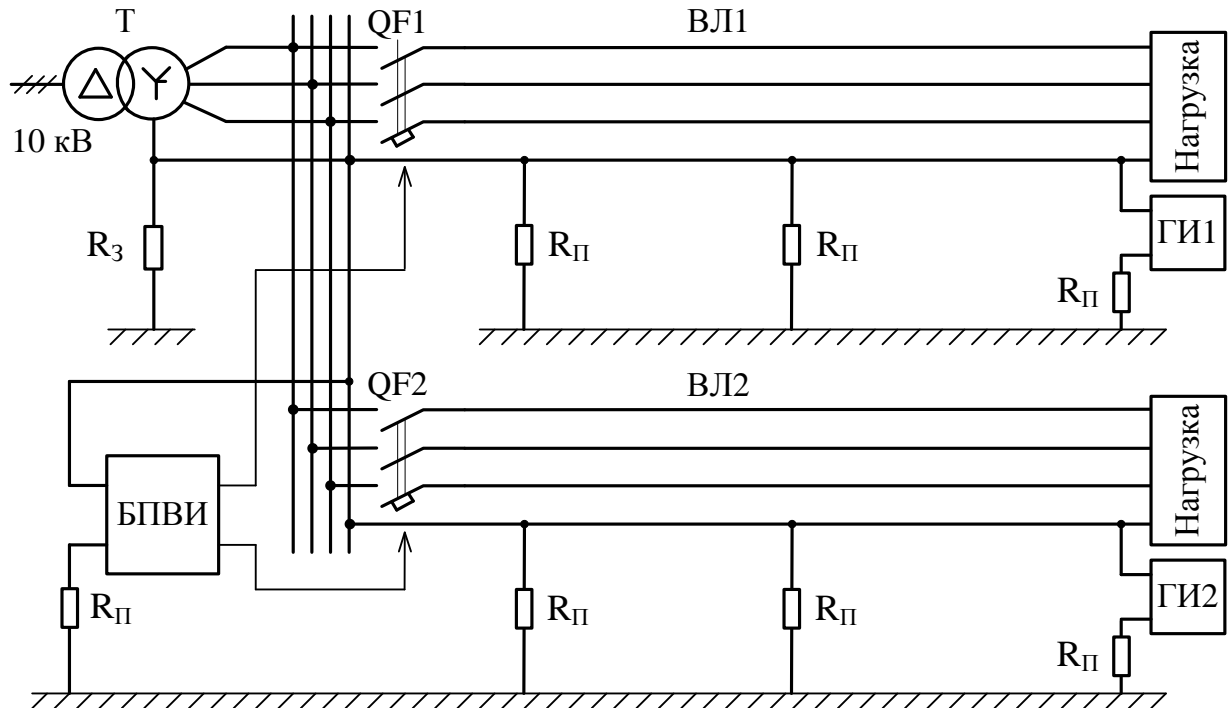


Рисунок 3.7 – Структурная схема устройства контроля состояния нулевого провода, построенного на использовании высокочастотных импульсов

Блок БПВИ, содержащий частотные фильтры, каждый из которых настроен на частоту генератора отдельной воздушной линии, контролирует состояние нулевых проводов этих линий. При обрыве нулевого провода какой-либо ВЛ снижается соответствующий высокочастотный сигнал до определённого значения. Блок БПВИ определяет повреждённую линию и отключает соответствующий автоматический выключатель QF1 или QF2, ликвидируя аварийную ситуацию.

Недостатками данного способа определения обрыва нулевого провода являются: ухудшение качества электроэнергии в данной сети при пропускании высокочастотных импульсов; достаточно высокая сложность устройства.

**Защита, построенная на использовании широтно-импульсных сигналов,** которые поочерёдно подаются в разные фазы.

Устройство (рисунок 3.8) содержит генератор импульсных сигналов 1, соединенный с распределителем импульсных сигналов 2, выход которого подключен к фазным проводам линии и первому входу схемы сравнения 5. Датчик тока 3, включенный в нулевой провод линии, соединен с усилителем высокой частоты 4, выход которого соединен с вторым входом схемы сравнения 5, к выходу которого подключен исполнительный орган 6. Перечисленные элементы устройства устанавли-



ваются в начале линии. В конце линии устанавливаются три конденсатора  $C$ , каждый из которых одним выводом соединен с одним из фазных проводов линии, а другие выводы соединены вместе и подключены к нулевому проводу.

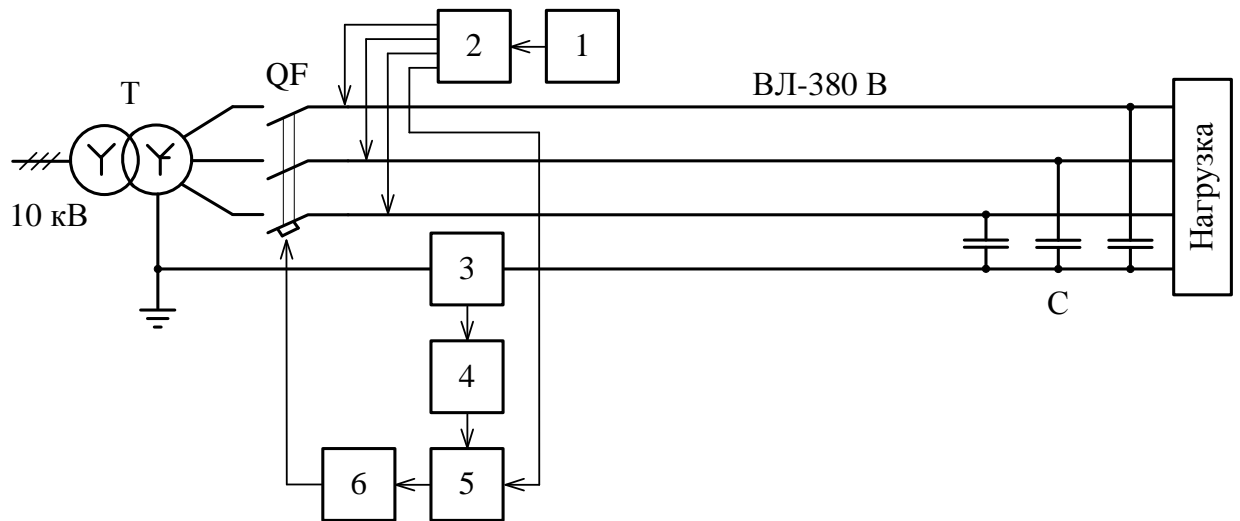


Рисунок 3.8 – Функциональная схема частотно-импульсной защиты

Устройство работает следующим образом. Прямоугольный импульс длительностью  $\tau_1$ , вырабатываемый генератором импульсных сигналов 1, подается через распределитель импульсных сигналов 2 поочередно в фазные провода линии, а также на первый вход схемы сравнения 5. При отсутствии обрыва провода импульс, выделенный датчиком тока 3 и усиленный усилителем высокой частоты 4, имеет нарастающий фронт за счет наличия конденсаторов  $C$  в конце линии и длительность  $\tau_2$ , причём в данном случае соблюдается условие

$$0 < \tau_2 < \tau_1, \quad (3.5)$$

Этот импульс подается на второй вход схемы сравнения 5 и его выходной сигнал равен нулю.

При обрыве фазного или нулевого провода на втором входе схемы сравнения 5 импульс отсутствует –  $\tau_2 = 0$ .

При коротком замыкании на линии электропередачи на втором входе схемы сравнения 5 возникает импульс длительностью  $\tau_2 = \tau_1$ . Это объясняется тем, что импульс, поступающий на датчик тока 3, проходит от фазного провода к нулевому проводу через место короткого замыкания, минуя конденсатор  $C$ , который в этом случае оказывается зашунтированным.

В обоих случаях происходит нарушение условия (3.5), что приводит к появлению сигнала на выходе схемы сравнения 5 и срабатыванию исполнительного органа защиты 6.

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

Соответствующим образом построенная измерительная и логическая части защиты позволяют выявлять указанные повреждения ВЛ.

### 3.2 Выбор режимного параметра для построения защиты, устанавливаемой в начале ВЛ-380 В

После анализа устройств защиты, проведённого в предыдущем разделе, к реализации примем устройство защиты, устанавливаемое в начале защищаемой линии.

Исследования режимных параметров (напряжений и токов) в начале воздушной линии ВЛ-380 при различных её режимах работы (нормальный режим, обрыв фазного провода, обрыв нулевого провода и широкое изменение несимметрии нагрузок потребителей, проведённые на компьютерной модели, в опытной электрической сети и при физическом моделировании, дали следующие результаты:

1 Изменения в начале ВЛ-380 В фазных напряжений относительно нулевого провода  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$ , напряжений прямой  $U_1$ , обратной  $U_2$  и нулевой  $U_0$  последовательностей не позволяют дать однозначную оценку режимам работы ВЛ-380 В.

2 Изменения в начале ВЛ-380 В токов, протекающих по фазным  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  и нулевому  $I_N$  проводам, токов прямой  $I_1$  и нулевой  $I_0$  последовательностей не позволяют дать однозначную оценку режимам работы ВЛ-380 В.

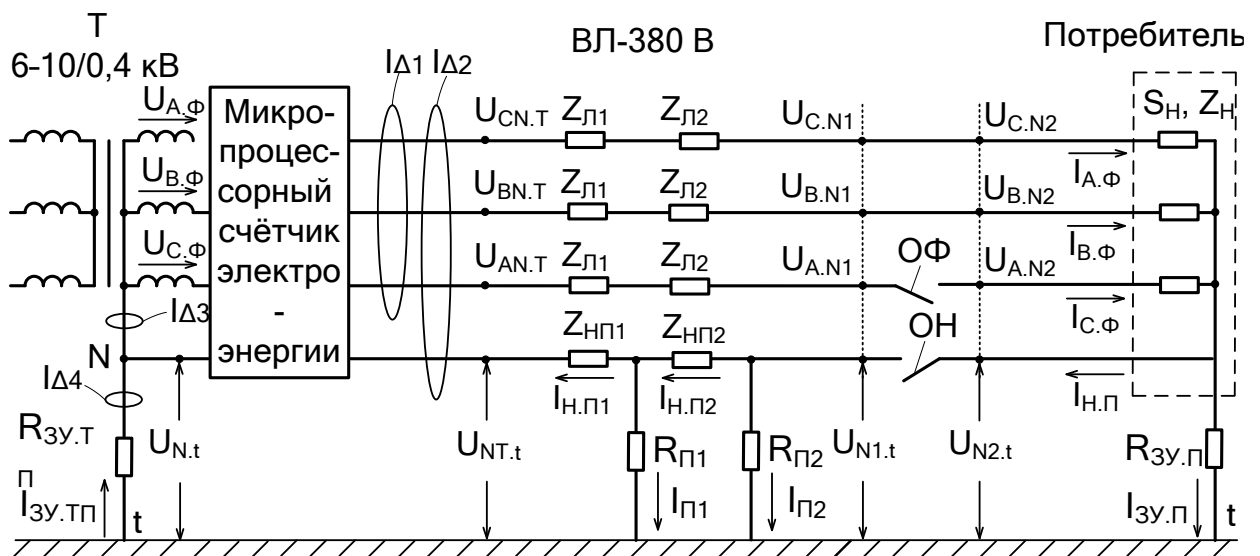


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В с воздушной линией электропередачи

3 Дифференциальный ток  $I_{\Delta 1}$ , равный сумме трёх фазных токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , не позволяют дать однозначную оценку режимам работы ВЛ-380 В.

4 Ток обратной последовательности  $I_2$  и дифференциальный ток  $I_{\Delta 2}$ , равный сумме трёх фазных  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , и нейтральному  $I_N$  токов, наиболее полно позволяют выявить обрыв провода ВЛ-380 В при реальных изменениях нагрузки.

Результаты исследования различных режимов работы электрической сети (нормального режима, обрывов фазных и нулевого проводов) при широком изменении различных параметров сети (изменение нагрузки в одной фазе или в двух фазах

одновременно в диапазоне от 100% до 0 % максимальной расчётной мощности; изменение сопротивления заземляющего устройства потребителя) на компьютерной модели, в опытной электрической сети и на физической модели практически совпадают и показали возможность использования тока обратной последовательности  $I_2$  для выявления обрывов только фазных проводов воздушной линии напряжением 380 В.

### 3.3 Возможность использования микропроцессорных счетчиков для выявления обрывов фазных проводов

Рассмотрим возможность использования трёхфазных микропроцессорных счётчиков электроэнергии для выявления несимметричных режимов работы ВЛ–380 В. На рисунке 3.9 показана схема установки таких счётчиков с передачей информации по силовой электрической сети – GSM-каналу.

В качестве примера рассмотрена система сбора и передачи информации о электропотреблении, построенная на базе продукции компании «Энергомера». Рассмотрим подробнее возможности применяемого оборудования.

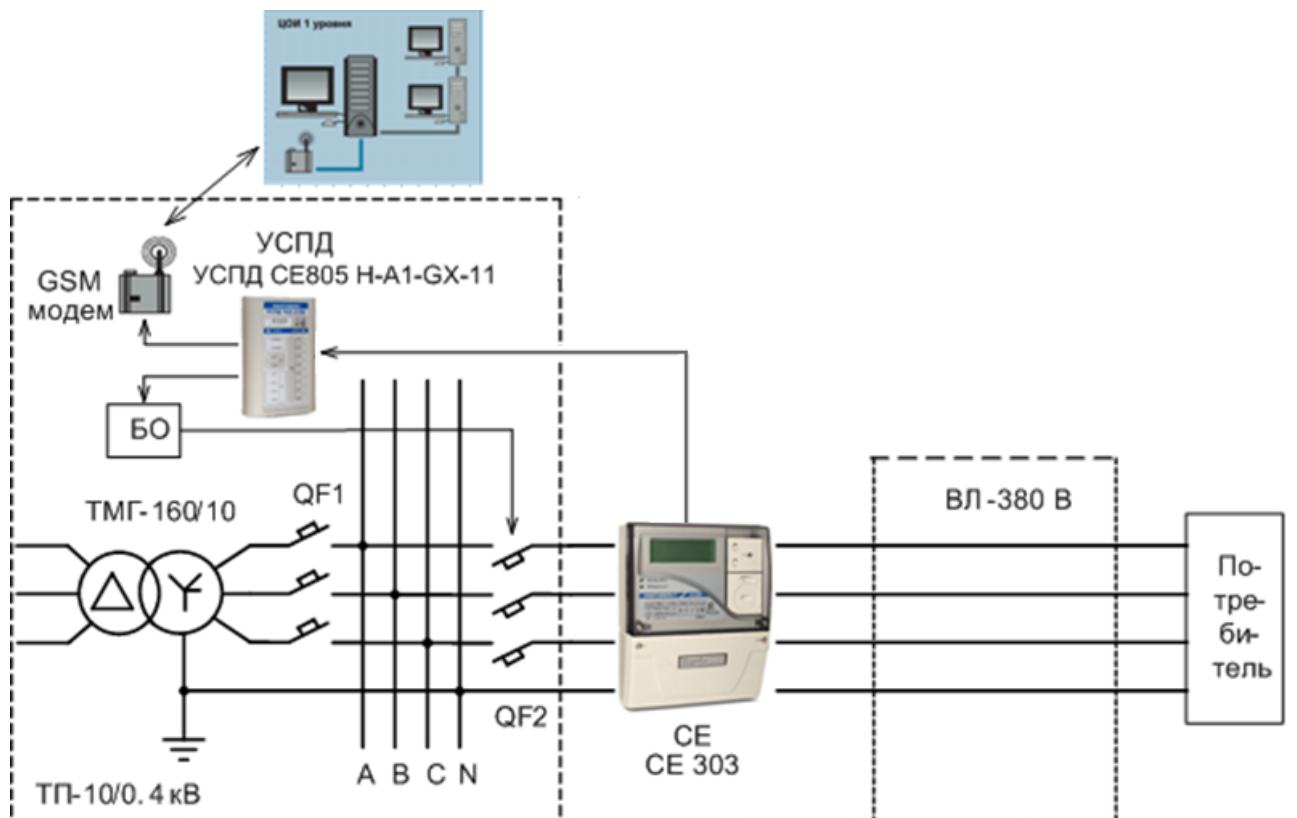


Рисунок 3.9 – Схема включения микропроцессорных счетчиков с передачей информации с использованием GSM-технологии

Современные счётчики кроме обработки информации о потребляемой электроэнергии позволяют вычислять некоторые показатели её качества, например, напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности, позволяют сопоставлять

вычисляемые параметры с некоторыми уставками и при выходе их за заданные значения производить отключения потребителей. Например, при недопустимом снижении напряжения на какой-либо фазе счётчик может отключить потребителя. В работе предлагается дополнить микропроцессорный счётчик некоторыми функциями, которые позволили бы выявлять несимметричные режимы работы ВЛ и организовать передачу отключающего импульса по GSM-каналу в трансформаторную подстанцию, где через блок отключения БО обеспечить отключение автоматического выключателя QF2, установленного в начале ВЛ. Кроме того, счётчик организует передачу сигнала об аварийном состоянии ВЛ–380 В диспетчерскому персоналу электрических сетей.

В микропроцессорном счётчике в его измерительно-логическом блоке (рисунок 3.10) предлагается внести дополнительные функции:

1 Вычисление тока обратной последовательности  $I_2$ .

2 Сравнение тока обратной последовательности  $I_2$  с уставкой тока  $I_2 \geq I_{уст.} = 0,25-0,4$  о.е. Повышение тока  $I_2$  выше определённого уровня может говорить об обрыве фазного провода ВЛ–380 В.

3 Организацию команды отключения ВЛ–380 В и информационного звонка диспетчерскому персоналу электрических сетей о возникновении обрыва фазного провода.

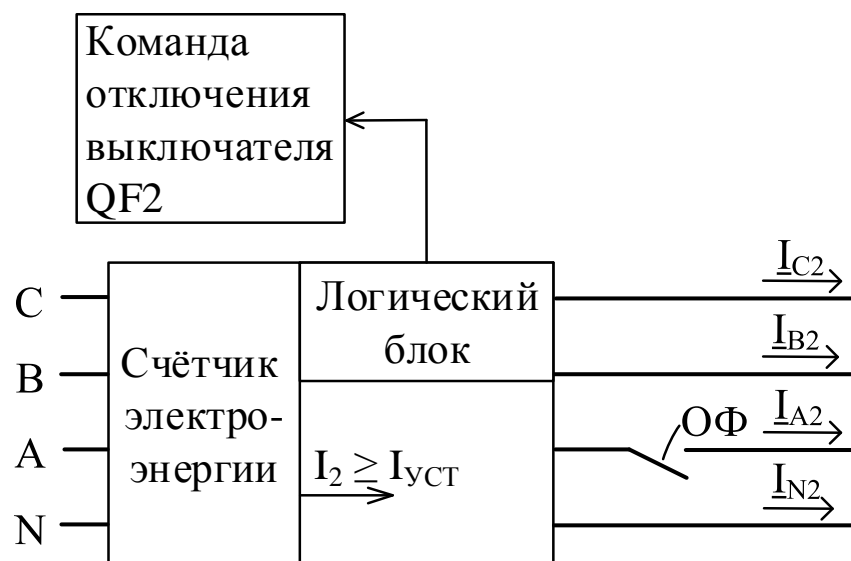


Рисунок 3.10 – Дополнительные функции микропроцессорного счётчика

### Выводы по разделу 3

1 В технической литературе (статьях, монографиях, авторских свидетельствах и патентах на изобретения) предложено довольно много технических решений – устройства защиты могут устанавливаться в начале или конце защищаемой линии.

2 Токовые защиты воздушных линий напряжением 380 В, построенные с использованием плавких предохранителей и автоматических выключателей, вследствие особенностей протекающих процессов при обрывах фазных и нулевого проводов не чувствуют рассматриваемый вид повреждения.

3 Для построения защиты ВЛ-380 В используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжения и напряжений фаз относительно земли; изменения обратной и нулевой составляющих в напряжениях и токах электрической сети, наложение токов не промышленной частоты и др.

4 При установке системы защиты в начале воздушной линии наиболее информативным является ток обратной последовательностей, который может быть использован для построения защиты.

5 Проведённый анализ функций и характеристик микропроцессорных счётчиков электрической энергии показал, что, измеряя входные напряжения и токи, они кроме определения основных расчётных параметров, связанных с электрической энергией, могут выполнять широкий круг дополнительных функций.

6 Разработан алгоритм работы устройства защиты при обрывах фазных и нулевого проводов, основанный на измерении токов обратной последовательности. Предложено в микропроцессорный счётчик электроэнергии типа СЕ-303, выпускаемый предприятием «Энергомера», внести дополнительную программу, позволяющую выявлять обрывы фазных и нулевого проводов и производить отключение автоматического выключателя, установленного в начале линии.

## 4 ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВЛ-380 В ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ

### 4.1 Оценка условий электробезопасности

Воздействие электрического тока на человека в настоящее время достаточно хорошо изучено, чтобы предотвратить и уберечь людей от электротравм.

Действие электрического тока на живую ткань в отличие от действия других факторов (пара, химических веществ, излучения и т. п.) носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм человека, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и механическое (динамическое) действия, являющиеся обычными физико-химическими процессами; одновременно электрический ток оказывает биологическое действие, которое является специфическим процессом, свойственным лишь живой ткани.

Действие электрического тока на организм человека зависит от двух факторов:

- Длительность протекания тока через тело человека;
- Интенсивности и частоты тока.

Эти два фактора являются независимыми друг от друга, но уровень риска будет больше или меньше, в зависимости от доли того или иного фактора. Сила тока, опасная для человека, будет зависеть от напряжения и сопротивление организма человека.

На практике, интенсивность тока определяется на основе предела напряжения порядка 50 В. Это напряжение принимает значения максимального тока, которое человек с минимальным внутренним электрическим сопротивлением может выдерживать при определенных условиях.

Указанное многообразие действий электрического тока на организм человека нередко приводит к различным электротравмам, которые условно можно свести к двум видам:

1) Местные электротравмы, при которых возникает локальное повреждение организма. Это ярко выраженное локальное нарушение целостности тканей тела, в том числе костных тканей, вызванное воздействием электрического тока или электрической дуги.

Чаще всего это поверхностные повреждения, т. е. поражения кожи, иногда других мягких тканей, а также связок и костей.

Опасность местных травм и сложность их лечения зависят от места, характера и степени повреждения тканей, а также от реакции организма на это повреждение. Как правило, местные травмы излечиваются, и работоспособность пострадавшего восстанавливается полностью или частично.

В редких случаях (обычно при тяжелых ожогах) человек погибает. При этом непосредственной причиной смерти является не электрический ток, а местное повреждение организма, вызванное током.

К характерным местным электротравмам относятся: электрические ожоги, электрические знаки, электрометаллизация кожи, механические повреждения – следствие резких произвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через тело человека, электроофтальмия.

2) Общие электротравмы, так называемый электрический удар, когда из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем поражается весь организм (или создается угроза поражения).

К числу общих электротравм относится электрический удар, под которым следует понимать возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, проявляющееся в произвольных судорожных сокращениях различных мышц тела. Появляется рассеянность, ослабевают память и внимание. Если подобных ярко выраженных заболеваний не наступает, то и в этом случае считается, что электрический удар резко ослабляет сопротивляемость организма к болезням, в первую очередь к сердечно-сосудистым и нервным.

Электрический удар является следствием протекания тока через тело человека; при этом под угрозой поражения оказывается весь организм из-за нарушения нормальной работы различных его органов и систем, в том числе сердца, легких, центральной нервной системы и т. д.

В зависимости от исхода поражения электрические удары можно условно разделить на следующие пять степеней:

I – судорожное едва ощутимое сокращение мышц;

II – судорожное сокращение мышц, сопровождающееся сильными, едва переносимыми болями, без потери сознания;

III – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимися дыханием и работой сердца;

IV – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания;

V – клиническая смерть, т. е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Исход воздействия электрического тока на организм человека зависит от ряда факторов, в том числе от значения и длительности прохождения тока, его рода и частоты, а также от индивидуальных свойств человека.

Электротравма – травма, вызванная воздействием электрического тока или электрической дуги.

Оба вида травм часто сопутствуют друг другу. Тем не менее, они различны и должны рассматриваться отдельно.

Сопротивление тела человека является переменной величиной, имеющей нелинейную зависимость от множества факторов, в том числе от состояния кожи, параметров электрической цепи, физиологических факторов и состояния окружающей среды.

Классификация факторов, влияющих на исход поражения человека электрическим током, представлена на рисунке 4.1.

Параметры электрической сети и цепи поражения

Если человек касается одновременно двух точек, между которыми существует напряжение, и при этом образуется замкнутая цепь, через его тело проходит ток.

Значение этого тока зависит от схемы прикосновения, т. е. от того, каких частей электрической установки касается человек, а также от параметров электрической сети.

Цепь протекания поражающего тока называется цепью поражения. Напряжение прикосновения – напряжение между двумя проводящими частями или между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного. Во всех случаях контакта человека с проводящими частями ЭУ, нормально или случайно находящимися под напряжением, это напряжение прикладывается ко всей цепи, куда входят сопротивления тела человека, обуви, пола или грунта, на котором стоит человек, и т. п. Напряжение прикосновения прикладывается только к человеку и его можно определить, как падение напряжения в теле человека:

Электрическое сопротивление различных тканей тела человека неодинаково: кожа, кости, жировая ткань, сухожилия и хрящи имеют относительно большое сопротивление, а мышечная ткань, кровь, лимфа и особенно спинной и головной мозг – малое. Следовательно, по сравнению с другими тканями кожа обладает очень большим удельным сопротивлением, которое является главным фактором, определяющим сопротивление тела человека в целом. Строение кожи весьма сложно. Она состоит из двух основных слоев: наружного, называемого эпидермисом, и внутреннего, являющегося собственно кожей и носящего название дерма.

Электрическое сопротивление. Обычно различают внешнее сопротивление (сопротивление кожи) и внутреннее сопротивление (сопротивление внутренних тканей: мышц, нервов и т. д.). Сопротивление внутренних органов не зависит от величины приложенного напряжения, а зависит только от изменения температуры тела. В среднем его значение может быть принято равным 500-1000 Ом.

Непосредственным физическим фактором поражения при электротравмах является электрический ток, проходящий через тело человека.

Токи различного рода неодинаково опасны (при прочих равных условиях) для организма. Наиболее опасным следует считать переменный ток промышленной частоты 50–60 Гц. Постоянный ток примерно в 4–5 раз безопаснее переменного частотой 50 Гц. Проходя через тело человека, он вызывает более слабые сокращения мышц и менее неприятные ощущения по сравнению с переменным током того же значения.

Влияние пути тока на исход поражения. Практикой и опытами установлено, что путь прохождения тока через тело человека играет существенную роль в исходе поражения. Так, если на пути тока оказываются жизненно важные органы: сердце, легкие, головной мозг, то опасность поражения весьма велика, поскольку ток воздействует непосредственно на эти органы. Если же ток проходит иными путями, то воздействие его на жизненно важные органы может быть лишь рефлекторным. При этом опасность тяжелого поражения сохраняется, но вероятность ее резко снижается.



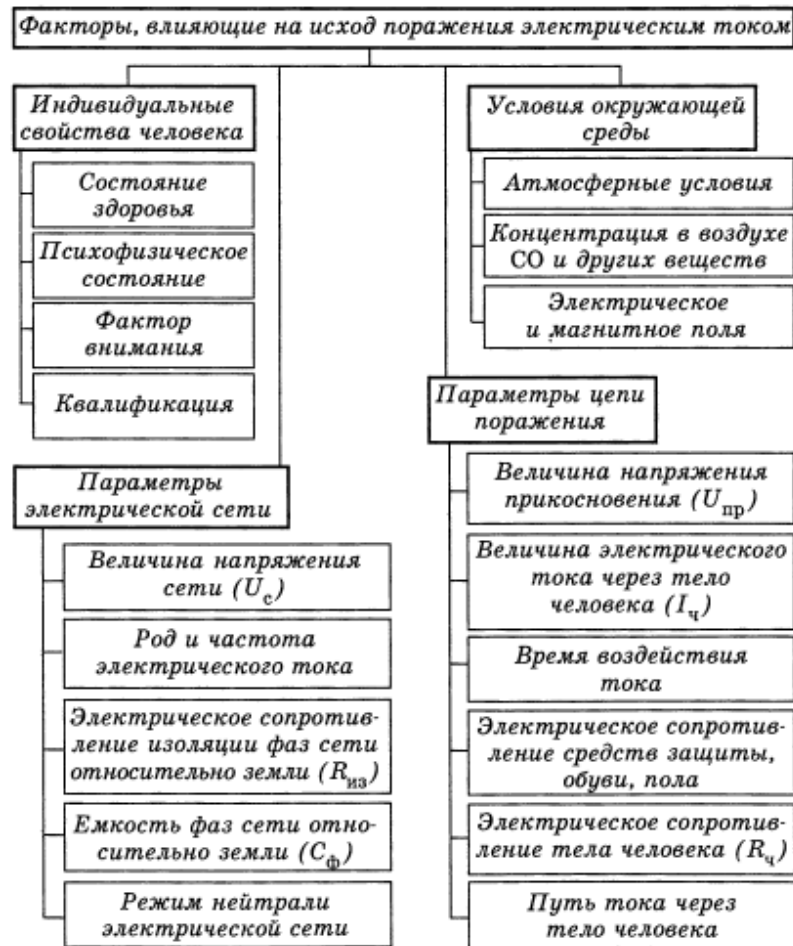


Рисунок 4.1 – Классификация факторов, влияющих на исход поражения человека электрическим током

Электроустановки в отношении мер электробезопасности разделяются на несколько видов:

- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с глухо заземленной или эффективно заземленной нейтралью;
- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор или резистор нейтралью;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях с глухо заземленной нейтралью;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью.

Глухозаземленная нейтраль – нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная непосредственно к заземляющему устройству. Глухо заземленным может быть также вывод источника однофазного переменного тока или полюс источника постоянного тока в двухпроводных сетях, а также средняя точка в трехпроводных сетях постоянного тока.

Изолированная нейтраль – нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через большое сопротивление приборов сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных им устройств.

В сетях, изолированных от земли, решающее влияние на исход однофазного прикосновения оказывает уровень сопротивления изоляции токоведущих частей относительно земли.

В электрической сети переменного тока напряжением до 1 кВ с глухо заземленной нейтралью нулевой проводник, совмещающий функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников (PEN-проводник), должен иметь повторные заземления. Нулевой рабочий проводник (N-проводник) тоже желательно (но не обязательно) повторно заземлять. При этом сопротивление заземлителя повторного заземления независимого проводника не нормируется.

Повторные заземления PEN-проводников должны быть выполнены на концах воздушных линий (ВЛ) или ответвлений от них длиной более 200 м [41], а также на вводах к электроустановкам, в которых в качестве защитной меры при косвенном прикосновении применено автоматическое отключение питания.

При этом в первую очередь следует использовать естественные заземлители, например, проложенные в земле металлические трубопроводы различных назначений, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов и смесей, трубопроводов канализации и центрального отопления, другие находящиеся в земле металлические конструкции и сооружения, подземные части опор ВЛ, а также заземляющие устройства, предназначенные для защиты от грозových перенапряжений. Указанные повторные заземления нулевого провода электрической сети выполняют, если более частые заземления не требуются по условию защиты ВЛ от грозových перенапряжений.

Общее сопротивление всех заземляющих устройств, служащих для повторных заземлений PEN-проводника (в том числе и заземляющих устройств, выполненных на базе естественных заземлителей) для каждой из ВЛ в любое

время года, включая самые неблагоприятные периоды (летние, приводящие к высыханию слоя земли, в котором находится заземлитель, и зимние, вызывающие промерзание указанного слоя) не должно превышать 5, 10 и 20 Ом при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В, соответственно. При этом сопротивление заземляющего устройства каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом, соответственно, при тех же значениях линейных напряжений.

В основу разработки требований к повторному заземлению проводников системы зануления был положен тщательный анализ многочисленных случаев гибели людей и сельскохозяйственных животных. Рассматривались аварийные режимы, связанные с обрывами и падениями на землю фазных проводов сети, замыканиями на землю и на зануленный корпус, нарушениями целостности нулевых проводов.

При разработке требований к повторным заземлениям нулевого провода электрической сети руководствовались следующими тремя главными принципами:

- все требования должны учитывать имеющийся мировой опыт, иметь строгое научное обоснование и лишь в виде исключения основываться на экспертных оценках;

- надежные электротехнические и рабочие характеристики заземляющих устройств должны достигаться при наименьших затратах, включая затраты на проектирование;

– должен быть технически осуществим контроль соответствия заземляющих устройств, предъявляемым к ним требованиям.

В настоящее время в [41] п.п. 1.7.102–1.7.103 отсутствуют какие бы то ни было требования к повторному заземлению РЕ-проводника. Его нужно обязательно повторно заземлять и в первую очередь в сельских электрических сетях, в которых канализация электроэнергии, как правило, осуществляется по воздушным линиям.

При нарушении целостности нулевого защитного проводника без повторных заземлителей, например, при обрыве, нормальная работа электроустановки не нарушится, в силу чего повреждение может длительное время, иногда месяцами, оставаться незамеченным. Но при появлении замыкания на корпус в каком-либо одном электроприемнике за местом обрыва (считая по ходу движения энергии), на корпусах всех соединенных с РЕ-проводником электроприемников (холодильников, стиральных машин, электроплит, компьютеров, электроутюгов и др.) во всех квартирах и домах появится опасное для жизни человека полное фазное напряжение 220 В. Это напряжение тоже может длительно оставаться на корпусах электрооборудования, по крайней мере до тех пор, пока не начнут гибнуть люди. Это самая опасная ситуация, связанная с наличием РЕ-проводника, не имеющего повторных заземлений. Эта ситуация может стать причиной групповых электропоражений. Но даже в том случае, когда целостность РЕ-проводника не нарушена, при любом замыкании на корпус на нем обязательно появится опасное для жизни человека электрическое напряжение. Точно такое же напряжение появится на корпусах всех остальных присоединенных к РЕ-проводнику электроприемников, находящихся за местом замыкания. Длиться это напряжение будет до тех пор, пока не сработает основная или резервная защита.

#### 4.1.2 Поражение человека электрическим током при касании оборванного фазного провода

Проанализируем несчастные случаи, произошедшие из-за обрыва фазного провода. Информация о несчастных случаях предоставлена службой производственного контроля и охраны труда «Челябэнерго».

09.08.2012 г. 17:22. Шестилетняя девочка, получила смертельные электротравмы, дотронувшись до оголённого провода. Шквалистый ветер, бушевавший в регионе 8 августа, стал причиной обрыва проводов линии электропередачи. Ребёнок поднял с земли оборванный провод.

Несмотря на реанимационные мероприятия, проводившиеся сельским фельдшером до прибытия скорой помощи, спасти ребёнка не удалось.

Иллюстрация данного несчастного случая приведена на рисунке 4.2.

Проанализируем какое напряжение было приложено к человеку. При нормальном режиме работы сети, проводимости фазных и нулевого проводов относительно земли имеют малые значения и с некоторым допущением могут быть приравнены к нулю.

Напряжение прикосновения – это напряжение между двумя проводящими частями или между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

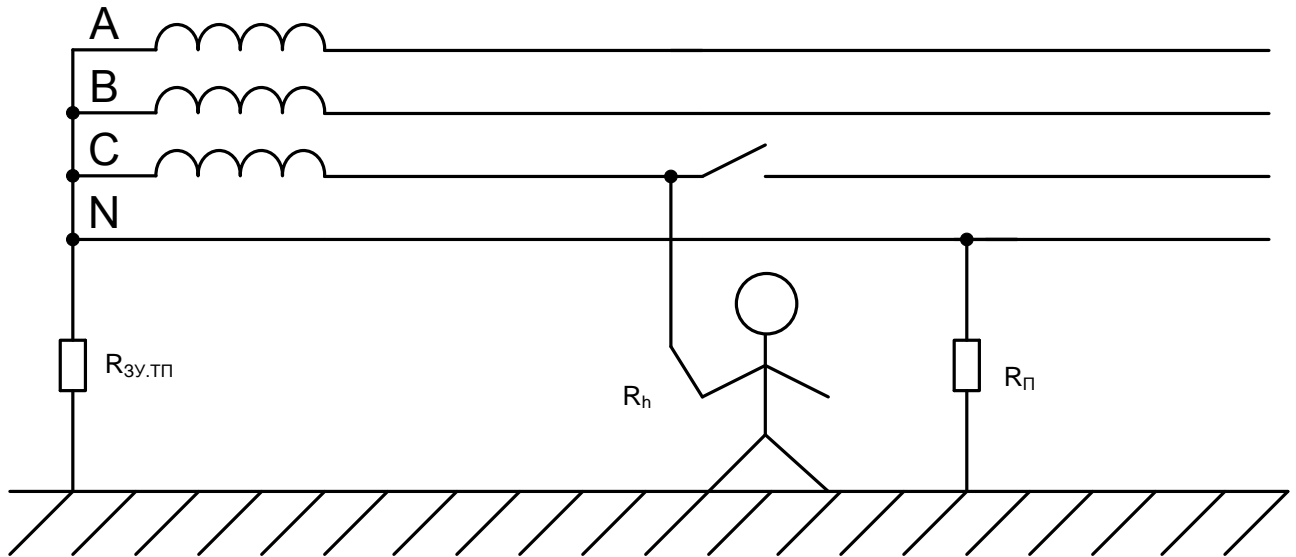


Рисунок 4.2 – Прикосновение человека к оборванному фазному проводу

Напряжение прикосновения в действительной форме будет [20]:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \frac{R_h}{R_h + R_{3У.ТП}}, \quad (4.1)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети, В;

$R_h$  – активное сопротивление тела человека, Ом;

$R_{3У.ТП}$  – активное сопротивление заземлителя трансформатора, Ом.

По формуле (4.1) получаем:

$$U_{\text{пр}} = 220 \frac{1000}{1000+4} = 219,12 \text{ В.}$$

Сопротивление  $R_{3У.ТП}$  измеряется в единицах Ом ; сопротивление же тела человека не опускается ниже нескольких сотен Ом. Следовательно, без большой ошибки можно пренебречь значением  $R_{3У.ТП}$  и считать, что при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью человек оказывается практически под фазным напряжением, а ток проходящий через его тело равен [20]:

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{R_h + R_{3У.ТП}}. \quad (4.2)$$

В расчетах не будем учитывать сопротивление обуви, так как несчастный случай произошел в летнее время, и пострадавшая могла быть без нее. Сопротивление тела человека примем равным  $R_h=1000$  Ом, а сопротивление заземлителя  $R_{3У.ТП} = 4$  Ом. Тогда, согласно (4.2), получаем:

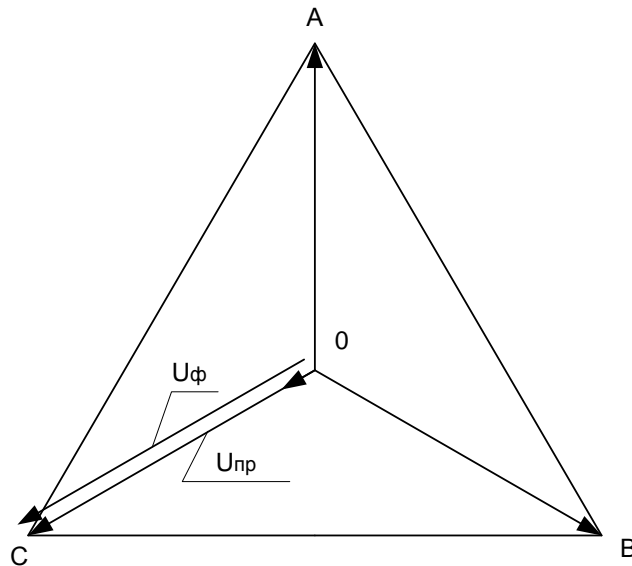


Рисунок 4.3 – Диаграмма напряжений при прикосновении человека к фазному проводу в нормальном режиме работы сети

$$I_h = \frac{220}{1000+4} = 0,219 \text{ А.}$$

Такая величина проходящего через тело тока является для человека смертельной.

Диаграмма напряжений для вышерассмотренного случая представлена на рисунке 4.3.

04.06.2012 г. в 17-30 во время грозы произошло прямое попадание молнии в фазный провод ВЛ-0,4 кВ, ф-1 от КТП, что привело к его пережогу и падению на землю. Мальчик (4 года) приблизился на недопустимое расстояние и попал под воздействие электрического тока. Его брат (7 лет) попытался спасти его и так же оказался под воздействием электрического тока. Проходивший мимо мужчина освободил пострадавших от действия электрического тока. Прибывшая на место происшествия фельдшер констатировал смерть младшего мальчика. Старший брат был направлен в районное отделение больницы для проведения дополнительного обследования, его жизни опасность не угрожает.

Иллюстрация данного несчастного случая приведена на рисунке 4.4.

Упавший на землю провод будет представлять собой одиночный заземлитель. Рассчитаем по формуле [20] сопротивление одиночного протяженного заземлителя растеканию тока:

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l^2}{d^2}; \quad (4.3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом/м;

$l$  – длина провода, лежащего на земле, м;

$d$  – диаметр упавшего провода, м.

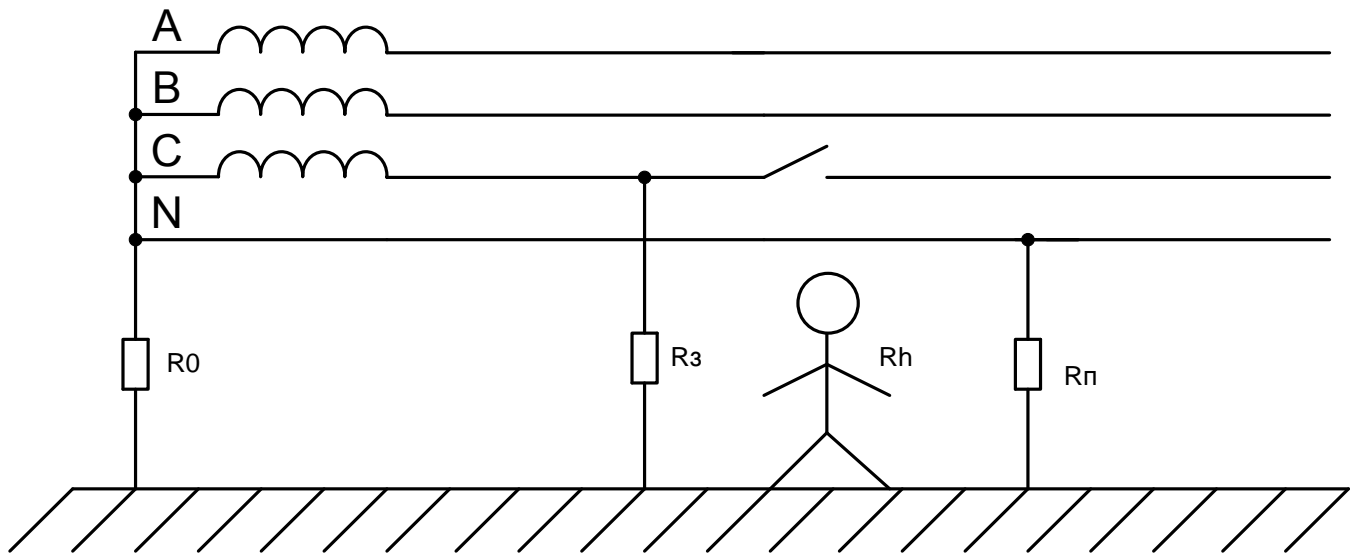


Рисунок 4.4 – Поражение человека электрическим током при падении фазного провода трехфазной четырехпроводной сети

Несчастный случай произошел во время грозы, земля была мокрой, примем удельное сопротивление грунта  $\rho = 100 \text{ Ом/м}$ . Длина провода лежащего на земле равна  $l = 30 \text{ м}$ . По формуле (4.3) получаем:

$$R_3 = \frac{100}{2\pi \cdot 30} \ln \frac{4 \cdot 30^2}{(50 \cdot 10^{-3})^2} = 7,52 \text{ Ом.}$$

Зная сопротивление заземлителя, найдем ток, стекающий в землю [20]:

$$I_3 = \frac{U_\Phi}{R_3 + R_{3\text{У.ТП}}}; \quad (4.4)$$

У протяженного заземлителя круглого сечения, находящегося на поверхности земли, изменения потенциальной кривой различны в разных направлениях. Наиболее резко потенциал падает вдоль оси заземлителя, а наиболее плавно - поперек оси по линии, проведенной через его середину.

Уравнения потенциальных кривых этого заземлителя имеют следующий вид:

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{2x+1}{2x-1}; \quad (4.5)$$

$$\varphi_y = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4y^2} + 1}{2y}; \quad (4.6)$$

Эквипотенциальные кривые на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя приближаются по форме к эллипса; на большом расстоянии от заземлителя и переходят в окружности, как показано на рисунке 4.5.

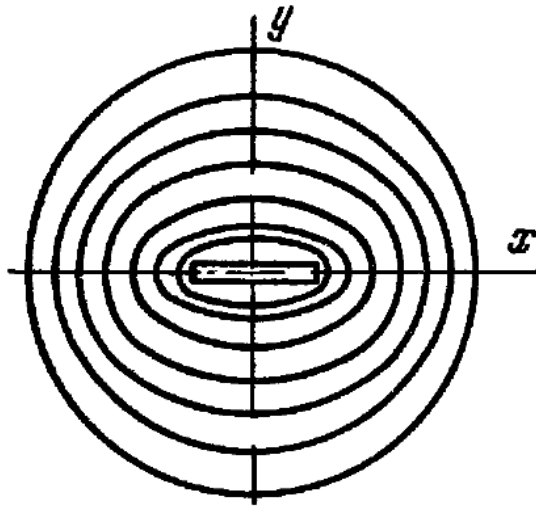


Рисунок 4.5 – Распределение потенциала на поверхности земли вдоль протяженного заземлителя круглого сечения, лежащего на земле

Напряжением шага называется напряжение между двумя точками цепи тока, находящимися одна от другой на расстоянии шага, на которых одновременно стоит человек.

Напряжение шага рассчитывается по формуле [20]:

$$U_{\text{ш}} = \varphi_X - \varphi_{X+A} \quad (4.7)$$

Поскольку  $\varphi_X$  и  $\varphi_{X+A}$  являются частями потенциала заземлителя, разность их так же есть часть этого потенциала. Поэтому выражение (11.7) можно записать в виде [20]:

$$U_{\text{ш}} = \varphi_3 \cdot \beta_1, \quad (4.8)$$

где  $\beta_1$  - коэффициент шага учитывающий форму потенциальной кривой.

Потенциал заземлителя определяется по формуле [24]:

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} \quad (4.9)$$

Найдем потенциал заземлителя:

$$\varphi_3 = \frac{19,09 \cdot 100}{2\pi \cdot 30} \ln \frac{2 \cdot 30}{50 \cdot 10^{-3}} = 71,84 \text{ В}$$

Для протяженного заземлителя на поверхности земли примем  $\beta_1 = 0,3$ . Тогда по формуле (4.8) получаем:

$$U_{\text{ш}} = 71,84 \cdot 0,3 = 21,55 \text{ В.}$$

03.07.2009 г. около 16 час. 20 мин. во дворе частного дома гражданин спиливал древесную поросль. При попытке подняться с колен, дотронулся рукой за стойку

металлического забора, на котором крепилась телеантенна, и был поражен электрическим током. Забор находился под напряжением вследствие того, что оборванная оттяжка трубы из стальной проволоки касалась фазного провода ввода в дом.

О происшествии узнали от хозяйки дома примерно в 16 час. 20 мин. Машина ОВБ прибыла на место в 16 час. 35 мин., пострадавший в это время был уже увезен на машине скорой помощи в больницу. Согласно медицинскому заключению гражданин получил электротравму, электроожог левой кисти III Б-ГУ степени, площадь поражения тела 8–10 %.

На рисунке 4.6 приведена иллюстрация данного несчастного случая.

В данном случае заземлитель выполнен в виде вбитой в землю трубы, его сопротивление растеканию тока рассчитывается по формуле [20]:

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (4.10)$$

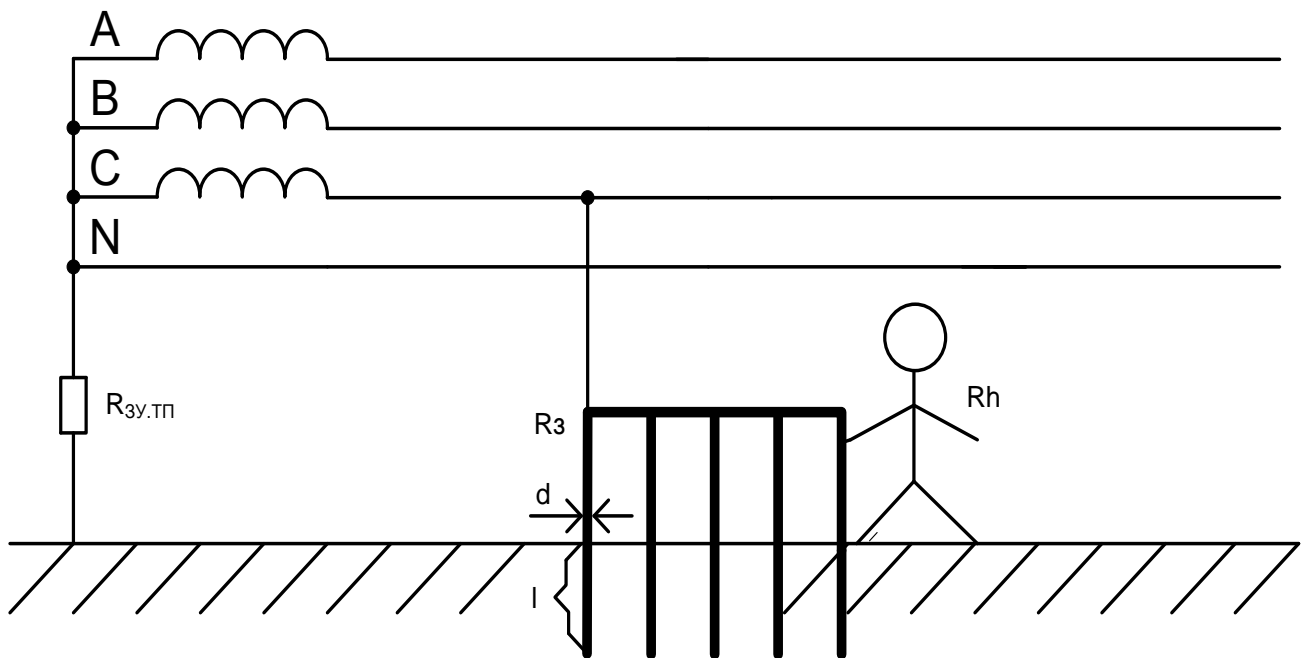


Рисунок 4.6 – Поражение человека электрическим током при касании металлической конструкции, находящейся под напряжением

Пусть в нашем случае металлическая труба имела диаметр 60 мм. и была заглублена на 1,0 м. Удельное сопротивление грунта примем равным  $\rho = 100$  Ом/м.

Тогда, по формуле (4.10) получаем:

$$R_3 = \frac{100}{2\pi \cdot 1} \ln \frac{4 \cdot 1}{60 \cdot 10^{-3}} = 66,82 \text{ Ом}$$



Забор состоял из 15 забитых в землю труб, с закрепленными между ними листами профнастила. Найдем полное сопротивление растеканию тока забора. Сопротивления входящих в него труб соединены параллельно, таким образом получаем:

$$R_{\text{забора}} = \frac{R_3}{15} = \frac{66,87}{15} = 4,46 \text{ Ом.}$$

Потенциал, который появился на заборе определяется по формуле:

$$\varphi_3 = \frac{U_{\text{ф}}}{R_3 + R_{\text{зу.тп}}} \cdot R_3; \quad (4.11)$$

Определим потенциал забора:

$$\varphi_3 = \frac{220}{4,46+4} \cdot 4,46 = 115,98 \text{ В.}$$

Напряжение прикосновения рассчитывается по формуле [20]:  
где  $\alpha_1$  – коэффициент прикосновения.

Примем согласно [20]  $\alpha_1 = 0.4$ , тогда:

$$U_{\text{пр}} = 115,98 \cdot 0,4 = 46,39 \text{ В}$$

Такое напряжение является опасным для человека.

#### 4.1.3 Поражение человека электрическим током при касании оборванного нулевого провода

Прикосновение к заземленному проводу нередко считают безопасным, полагая, что напряжение этого провода относительно земли незначительно. Как было рассмотрено выше при значительной несимметрии нагрузки по фазам напряжение на оборванном нулевом проводе может быть опасным для человека. Опасность значительно возрастает, если в момент касания человеком оборванного нулевого провода в сети произойдет короткое замыкание.

Проанализируем изменение напряжения между нейтральной точкой нагрузки и землей, при пофазном изменении нагрузки в различных режимах работы системы. Все измерения проведены на компьютерной модели. Параметры системы такие же как в рассмотренных ниже пунктах.

Рассмотрим режим работы, когда оборван нулевой провод.

Построим диаграммы, когда в одной и двух фазах отсутствует нагрузка.

В случае, рассмотренном на рисунке 4.7а при отсутствии нагрузки на одной фазе ( $P_A \approx 0$  кВт) и отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{\text{зу.п}} = \infty$ ) потенциал нейтрали N2 трёхфазной нагрузки переместится из центра треугольника  $t$  линейных напряжений на середину вектора линейного напряжения  $\underline{U}_{\text{BC}}$ . При этом напряжение на фазе А возрастёт до значения  $U_{A2.N2} = 1,5 \cdot U_{\text{ф}}$ , а два других напряжения снизятся до  $U_{B2.N2} = U_{C2.N2} = 0,866 \cdot U_{\text{ф}}$ .

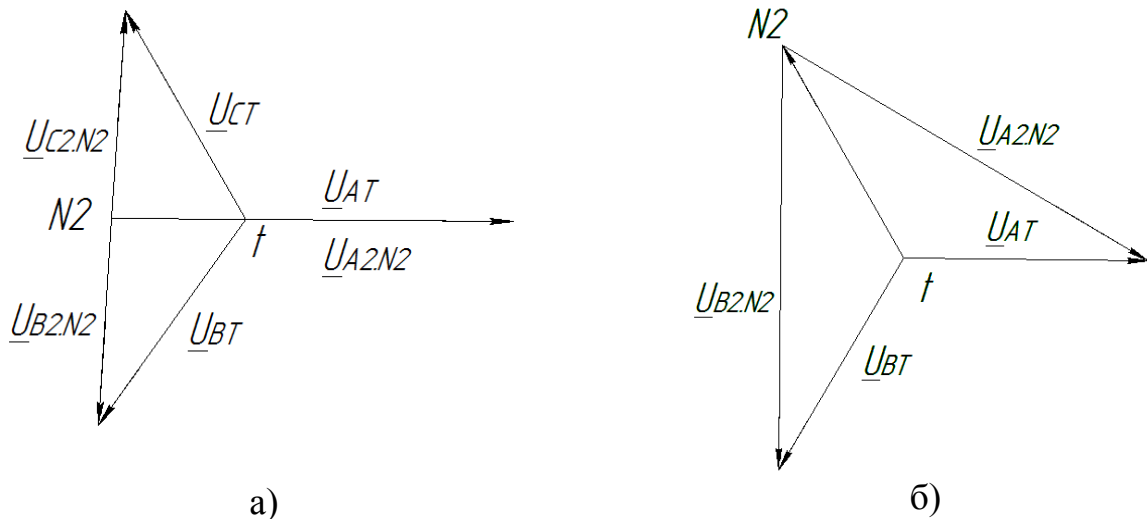


Рисунок 4.7 – Диаграмма напряжений: а – отсутствует нагрузка в фазе А; б - отсутствует нагрузка в двух фазах (А и В)

В случае, рассмотренном на рисунке 4.7б при отсутствии нагрузки на двух фазах ( $P_A \approx P_B \approx 0$  кВт) и  $R_{3У.П} = \infty$  потенциал нейтрали N2 трёхфазной нагрузки переместится из центра треугольника t линейных напряжений в вершину треугольника в точку С. При этом напряжения на нагрузке потребителя будут  $U_{C2.N2} = 0$ ,  $U_{A2.N2} = U_{B2.N2} = \sqrt{3} \cdot U_{\Phi} = U_{Л}$ .

В этих двух случаях соответственно напряжения на оборванном нулевом проводе со стороны потребителя относительно земли составят  $U_{N2,t} = 0,5 \cdot U_{\Phi}$  и  $U_{N2,t} = U_{\Phi}$ . Именно оборванный нулевой провод со стороны потребителя с указанными напряжениями  $U_{N2,t}$  является опасным для человека.

## 4.2 Оценка технико-экономической эффективности

### 4.2.1 Оценка движущих и сдерживающих сил и ресурсов разработки проекта защиты ВЛ–380 В от обрыва фазного и нулевого проводов при помощи счетчиков

Произведем оценку потенциала проекта использования счетчиков для защиты от обрывов фазного или нулевого проводов при помощи «Поля сил» Курта Левина.

Согласно данному методу анализа, любую сложившуюся в экономике ситуацию можно рассматривать как модель, находящуюся в состоянии равновесия между движущими и сдерживающими силами реализации целей. Поле сил характеризует организационную надежность состояния, устойчивость и направленность развития.

Для того, чтобы произвести изменения необходимо вывести ситуацию из равновесия, то есть величина или количество движущих сил должны быть больше сдерживающих сил.

Схема поля сил представлена на рисунке 4.8.

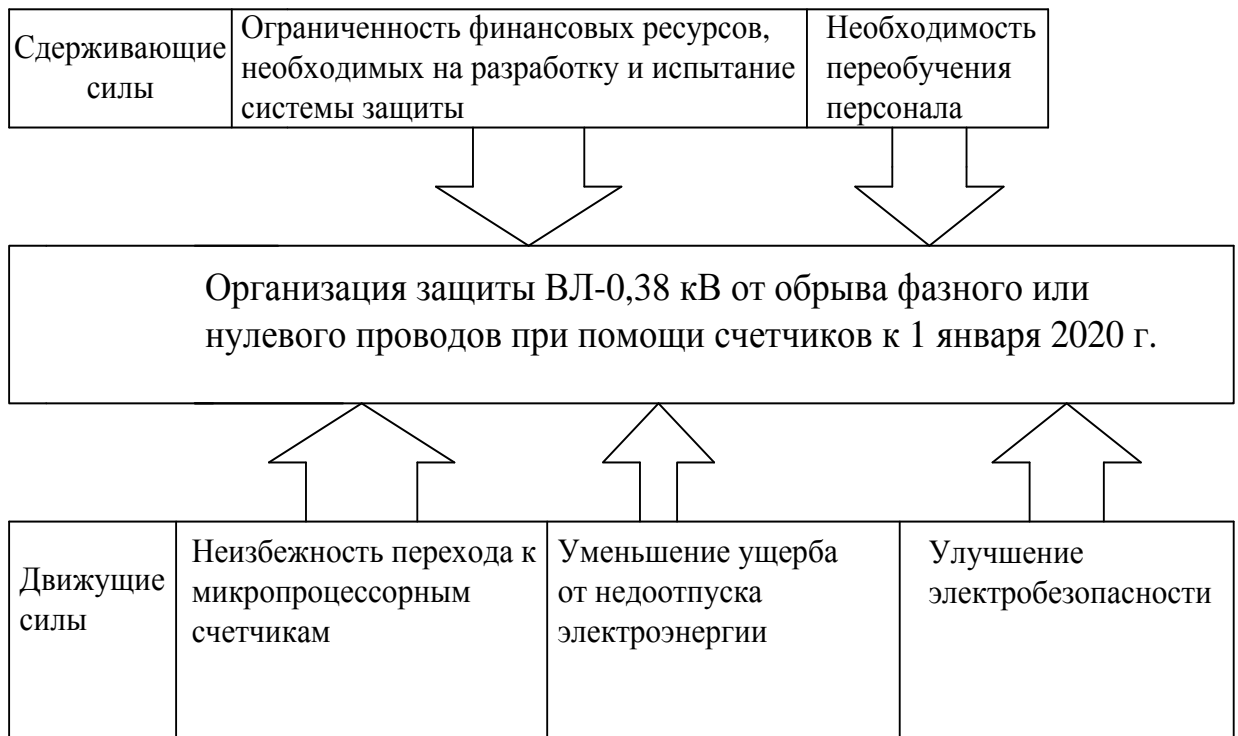


Рисунок 4.8 – Поле сил проекта защиты ВЛ–380 В от обрывов фазных и нулевого провода при помощи счетчиков

Главной сдерживающей силой является нехватка финансовых ресурсов. Создание принципиально новой системы защиты ее испытание и получение разрешения на применение связано со значительными финансовыми вложениями, которые не могут быстро окупиться.

Главной движущей силой является неизбежность перехода к микропроцессорным счетчикам, которые помимо выполнения основных функций по контролю энергопотребления могут анализировать состояние системы электроснабжения в непосредственной близости от потребителя. А имеющиеся каналы связи счетчика с системами более высокого уровня могут использоваться для передачи информации об аварийных режимах.

Анализ показал, что движущие силы преобладают над сдерживающими. Это указывает на способность проекта к развитию, а также на то, что данная цель будет достигнута.

#### 4.2.2 STEP-анализ для факторов внешней среды проекта

STEP анализ – инструмент анализа дальнего окружения, позволяющий выявлять возможности и угрозы по отношению к анализируемому проекту с точки зрения поставленной цели. Рассмотрим различные факторы, которые могут влиять на реализацию проекта.

Политические факторы (P):

- идут процессы либерализации рынка электроэнергии;
- нет однозначной правовой базы на рынке бытового учета электроэнергии.

#### Экономические факторы (E):

- многочисленные хищения электроэнергии бытовыми потребителями;
- после ликвидации существующего в России перекрестного субсидирования и неизбежного отказа от системы самообслуживания перед российскими стоит проблема минимизации затрат на снятие показаний счетчиков и выписку счетов потребителям, а также проблемы заключения с каждым бытовым потребителем персонального договора на условия поставки электроэнергии;
- многочисленные создаваемые сбытовые организации в условиях реструктуризации и жесткой конкуренции могут экономически выжить, только предлагая своим потребителям гибкие взаимовыгодные тарифные системы, дифференцированные как по уровням потребления (блочные тарифы), так и по времени;

#### Социальные факторы (S):

- нехватка специалистов, способных работать с современным оборудованием;
- многочисленные пострадавшие от обрывов фазного или нулевого проводов ВЛ-0,38 кВ.

#### Технологические факторы (T):

- применение счетчиков нового поколения на строящихся объектах и постепенная их замена на уже функционирующих;
- возможность расширения функций счетчика;
- наличие каналов связи для быстрого обмена информацией счетчика с системами более высокого уровня;
- неэффективность существующей системы защиты от обрывов фазного и нулевого проводов.

Таким образом мы имеем ситуацию идеальную для применения новой системы защиты. Так как страна только переходит на новые счетчики и только создается единая система контроля и учета, то сейчас можно дополнять средства учета электроэнергии новыми функциями при том, что их технические возможности в настоящее время используются не до конца.

#### 4.2.3 SWOT-анализ необходимости реализации проекта

Для доказательства необходимости реализации проекта создания новой системы защиты ВЛ–0,38 кВ от обрыва фазного или нулевого проводов SWOT проведем сравнительный анализ для двух вариантов методом SWOT:

- 1 Сеть работает с существующей на данный момент системой защиты (см. таблицу 4.1);
- 2 Сеть работает с системой защиты, рассчитанной в данном проекте (см. таблицу 4.2).

После проведения SWOT анализа можно сделать вывод о том, что реализовывать данный проект необходимо: предлагаемый проект имеет больше сильных сторон, он более защищен от угроз внешней среды и имеет широкие возможности для развития.

Таблица 4.1 – Сеть работает с существующей на данный момент системой

<p>S – сильные стороны:</p> <p>1) наличие квалифицированного персонала, имеющего опыт работы с данным оборудованием.</p>	<p>W – слабые стороны:</p> <p>1) случаи электротравм у населения; 2) неэффективная работа РЗ; 3) возникновение перерывов в работе;</p>
<p>O – возможности во внешней среде:</p> <p>1) не эффективная, но стабильная работа системы учета электропотребления бытовых потребителей</p>	<p>T – угрозы внешней среды:</p> <p>1) штрафы за недоотпуск электроэнергии; 2) штрафы за неэффективную работу РЗ и связанные с ней электротравмы населения.</p>

Таблица 8.2 – Сеть работает с системой защиты, рассчитанной в данном проекте

<p>S – сильные стороны:</p> <p>1) уменьшается количество электротравм; 2) эффективнее выявляются случаи обрыва фазного или нулевого проводов; 3) обеспечение непрерывной работы сети;</p>	<p>W – слабые стороны:</p> <p>1) необходимость больших затрат на разработку и внедрение; 2) необходимость обучения эксплуатационного персонала.</p>
<p>O – возможности во внешней среде:</p> <p>1) уменьшение убытков энергоснабжающей организации за счет надежной работы устройств РЗА;</p>	<p>T – угрозы внешней среды:</p> <p>1) Нежелание потребителей переходить на многотарифный учет электроэнергии; 2) адаптация к новому оборудованию.</p>

#### 4.2.4 Планирование целей проекта в дереве целей

Дерево целей представляет собой структурную модель, которая показывает соподчиненность и связь целей подразделений в иерархии управления. Для его построения сверхзадача высшего уровня, или миссия предприятия, делится на проектные цели его подразделений, операционные цели исполнителей.

Дерево целей представлено на рисунке 4.9.

#### 4.2.5 Планирование мероприятий по реализации проекта. План-график Ганта

Небольшой комплекс работ может быть показан в виде ленточного графика по этапам работ, определяемых поставленными целями. По этапам назначаются исполнители и ориентировочная продолжительность работ. На графике отрезками прямых изображается весь цикл работ. Этапы работы могут выполняться как параллельно, так и последовательно.

Планирование мероприятий по реализации проекта представлено в таблице 4.3.



Рисунок 4.9 – Дерево целей проекта

#### 4.2.6 Срок окупаемости вложений

Окупаемость капитальных вложений один из показателей, характеризующий период, в течение которого возместятся (окупятся) дополнительные капитальные вложения за счет экономии на себестоимости продукции, или отношение капитальных вложений к экономическому эффекту, получаемому благодаря этим вложениям. Определим срок окупаемости создания системы защиты воздушных линий напряжением 380 В от обрывов фазных и нулевого проводов для части коттеджного поселка, питающейся от одной ТП.

Срок окупаемости вложений определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta Y}, \quad (4.12)$$

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

$\Delta Y$  – экономия на платежах или предотвращенный ущерб, руб/год.

Расчет капитальных затрат на внедрение новой системы защиты воздушных линий напряжением 380 В от обрывов фазных и нулевых проводов выполняется в форме сметы в ценах 2013 года (см. таблицу 4.4).



Таблица 4.4 – Смета капитальных затрат на организацию учета электроэнергии с помощью PLC-канала

Блок системы	Кол-во, шт.	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость установки, руб.	Стоимость наладки, руб.	Капитальные затраты, руб.
Счетчик однофазный многотарифный Меркурий 200.04 с встроенным модемом	20	23000	30000	10000	63000
Счётчик трёхфазный многотарифный Меркурий 230 ART-00 CLN совстроенным модемом	4	8600	7000	4000	19600
Концентратор «Меркурий 225.2»	3	16800	6000	12000	34800
GSM-шлюз «Меркурий 228»	1	10000	1000	4000	15000
GSM-терминал для диспетчерского пункта	1	7000	1000	5000	13000
Фильтр подключения	1	4800	1000	5000	10800
Технологическое программное обеспечение	1	бесплатное	300	1000	1300
Итого					157500

Определим ущерб от недоотпуска электроэнергии в год:

$$\Delta Y = Y_0 \cdot \Delta W_{\text{П.Э}}, \quad (4.13)$$

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

$\Delta W_{\text{П.Э}}$  – количество недоотпущенной электроэнергии за время перерывов электроснабжения потребителей, кВт·ч.

$$\Delta W_{\text{П.Э}} = \frac{W_{\text{А.ГОД}}}{T_{\text{ГОД}}} T_{\text{ПР}}, \quad (4.14)$$

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.



Потребляемая за год энергия находится как:

$$W_{\text{А.ГОД}} = P_{\text{P}} \cdot T_{\text{ИМ}} = 1400 \cdot 3500 = 4900 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Используя новую систему защиты удастся уменьшить время выявления аварийного режима линии с 0,29 ч/год до нуля. Таким образом  $T_{\text{ПР}} = 0,29$  ч/год.

Подставив найденные значения в формулу (4.14), получим:

$$\Delta W_{\text{П.Э}} = \frac{4900}{8760} \cdot 0,29 = 0,161 \text{ МВт/год.}$$

Тогда по формуле (4.12) получаем:

$$T_{\text{ОК}} = \frac{157500}{21283} = 7,4 \text{ лет.}$$

В энергетике проект считается жизнеспособным, если его время окупаемости меньше 8 лет

Выводы по разделу 4:

1 Проведённый анализ литературных источников по проблеме обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий электрических сетей напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью показал, что данный вид повреждения электрической сети является опасным как для питающихся электроприёмников в связи с частичной пофазной потерей напряжений или значительной несимметрией напряжений фаз относительно нулевого рабочего провода, так и населения и животных, которые могут оказаться около места повреждения воздушной линии.

2 При обрыве фазного провода наиболее опасным является оборванный и свисающий с опоры фазный провод со стороны источника питания – трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ. Напряжение на этом проводе практически равно фазному напряжению и является опасным для людей и животных, которые при определённых условиях могут касаться оборванного провода.

3 При обрыве нулевого провода воздушной линии опасным является провод, свисающий с опоры со стороны потребителя. Величина напряжения на этом проводе зависит от несимметрии фазных нагрузок и может изменяться в широком диапазоне – от нуля до значения фазного напряжения.

4 Проведенный анализ технико-экономической эффективности показал, что реализация проекта имеет массу возможностей, были выявлены возможности и угрозы по отношению к анализируемому проекту с точки зрения поставленной цели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложено новое решение актуальной научно-технической задачи, состоящее в обеспечении условий электробезопасности при эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В посредством внедрения в эксплуатацию системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов в указанных линиях.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы работы:

1 На компьютерной и физической моделях электрической сети напряжением 380 В были проведены исследования различных режимов её работы при обрывах фазных и нулевого проводов, результаты которых позволили установить закономерности в изменениях напряжений и токов.

2 Экспериментальные исследования в опытной электрической сети (выборка из опытных данных, полученных ранее при проведении исследований кафедрой ЭССиСЭ) подтвердили достоверность полученных результатов на компьютерной и физической моделях.

3 Анализ установленных закономерностей в изменении напряжений и токов при возникновении обрывов фазных и нулевого проводов дал возможность обосновать логические признаки, характеризующие различные режимы, возникающие при эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В, и позволяющие выявлять эти режимы.

5 Предложено использовать для выявления обрывов проводов воздушной линии напряжением 380 В микропроцессорный счётчик электрической энергии, устанавливаемый в начале линии. В качестве информационного параметра предложено использовать ток обратной последовательности.

6 Разработан алгоритм работы системы защиты, который предложено внести в микропроцессорный счётчик электроэнергии типа СЕ-303, выпускаемый предприятием «Энергомера», в качестве дополнительной программы. Это позволит выявлять обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В и производить отключение автоматического выключателя, установленного в начале линии.

7 Полученные в ходе написания работы результаты могут быть рекомендованы для внедрения учебном процессе по специальности «Электроснабжение», могут быть интересны для электрических сетей ОАО «Челябэнерго», также использованы для дальнейших исследований.

8 По результатам работы опубликована статья в сборнике «Наука ЮУрГУ: Материалы 69-й научной конференции. Секции технических наук. 2016 г.» – приложение А.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 А. с. № 180238 СССР, МПК Н 02 d. Устройство для селективной защиты от утечек сетей с изолированной нейтралью / Р.А. Богданов. – № 852785/24-07; заявл. 16.08.1963; опубл. 21.03.1966, Бюл. № 7. – 2 с.
- 2 А. с. № 702449 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от повреждения нескольких трехфазных потребителей / Н.М. Попов. – № 2617338/24-07; заявл. 12.05.78; опубл. 05.12.79, Бюл. № 45. – 3 с.
- 3 А. с. № 714562 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/08. Устройство для токовой защиты участка трехфазной линии от обрыва одного из фазных проводов / В.И. Сукманов, И.Г. Беляков, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов, Р.Ш. Сагаутдинов. – № 2585953/24-07; заявл. 03.03.1978; опубл. 05.02.1980, Бюл. № 5. – 3 с.
- 4 А. с. № 815833 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от несимметричного режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 2775470/24-07; заявл. 05.06.1979; опубл. 23.03.1981, Бюл. № 11. – 3 с.
- 5 А. с. № 845115 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> G 01 R 27/20. Устройство для контроля целостности заземляющей цепи передвижных электроустановок / Ю.В. Ситчихин, А.И. Сидоров. – № 2792737/18-21; заявл. 09.07.1979; опубл. 07.07.1981, Бюл. № 25. – 2 с.
- 6 А. с. № 854249 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты электроустановки от обрыва нулевого провода в сети с глухо заземленной нейтралью / Э.Г. Краус, Б.Л. Геллер. – № 2842892/07; заявл. 22.11.1979; опубл. 07.05.1992, Бюл. № 17. – 3 с.
- 7 А. с. № 884024 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной линии напряжением до 1000 В от обрыва фазных проводов / Р.Ш. Сагаутдинов, В.И. Сукманов, В.И. Красников. – № 2895360/24-07; заявл. 19.03.1980; опубл. 23.11.1981, Бюл. № 43. – 3 с.
- 8 А. с. № 995190 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной линии напряжением до 1000 В от обрыва фазных проводов / Р.Ш. Сагаутдинов, В.И. Красников, В.Г. Гловацкий. – № 3317197/24-07; заявл. 17.07.1981; опубл. 07.02.1983, Бюл. № 5. – 3 с.
- 9 А. с. № 997164 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/17. Устройство для защиты воздушной линии электропередачи от обрыва фазного провода / Х.М. Желиховский, В.П. Кобазев, В.Е. Матвиенко, С.Ф. Капштык. – № 2928145/24-07; заявл. 22.05.1980; опубл. 15.02.1983, Бюл. № 6. – 3 с.
- 10 А. с. № 1050031 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для определения режима электрической сети / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 3275380/24-07; заявл. 10.04.1981; опубл. 23.10.1983, Бюл. № 39. – 6 с.
- 11 А. с. № 1023494 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16. Устройство для определения режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью / А.М. Ершов, О.А. Петров, Ю.В. Исаев. – № 3387655/24-07; заявл. 22.01.1982; опубл. 15.06.1983, Бюл. № 22. – 6 с.

12 А. с. № 1035715 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты линии электропередачи с ответвлениями от обрыва фазных проводов / Х.М. Желиховский, В.П. Кобазев. – № 3410805/24-07; заявл. 24.03.1982; опубл. 15.08.1983, Бюл. № 30. – 3 с.

13 А. с. № 1206873 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты воздушной линии электропередачи от обрыва проводов / В.П. Кобазев, Р.Ш. Сагаутдинов, А.И. Селивахин, Х.М. Желиховский. – № 3717476/24-07; заявл. 02.04.1984; опубл. 23.01.1986, Бюл. № 3. – 3 с.

14 А. с. № 1210173 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от обрыва фазного провода в электрических сетях напряжением 0,38 кВ / Р.Ш. Сагаутдинов, В.П. Кобазев. – № 3765590/24-07; заявл. 04.07.1984; опубл. 07.02.1986, Бюл. № 5. – 5 с.

15 Ануфриев, И.Е. Matlab 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

16 Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

17 Валеев, Р.Г. Исследование токов и напряжений в различных режимах работы воздушных линий напряжением 380 В на компьютерной модели [Текст] / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, Г.С. Валеев, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т.2. – С. 149–150.

18 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.

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

20 Долин, П.А. Основы техники электробезопасности в электрических установках: учебное пособие / П.А. Долин – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

21 Ершов, А.М. Исследование аварийных режимов в сельских электрических сетях напряжением 380 В [Текст] / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 6. – С. 18–21.

22 Клочков, А.Н. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода / А.Н. Клочков // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 1. – С. 221–223.

23 Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов/ И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 568 с.

24 Коструба, С.И. Человека защитит УЗО при авариях на воздушных линиях электропередачи [Текст] / С.И. Коструба // Новости электротехники. – 2004. – № 1 (25).

25 Методические указания по выбору устройств релейной защиты в сетях 0,38–35 кВ сельскохозяйственного назначения // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 11. – М.: ВГПИНИИ «Сельэнергопроект», 1976. – 116 с.

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

27 Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для дипломного проектирования: учебник для вузов / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

28 Номограммы и таблицы расчётов электрических сетей 0,38 кВ // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 7. – М.: ВГПИИИ «Сельэнергопроект», 1996. – 148 с.

29 Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование несимметричных режимов работы воздушных линий напряжением 380 В с целью выбора устройств для их выявления» / По договору оказания услуги с Челябэнерго № 2012347 от 03.09.2012 г. (№ 12-04 от 02.10.2012 г.). – Челябинск, ЮУрГУ. – 2012. – 148 с

30 Пат. № 2230415 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 Н 5/10, G 01 R 31/02. Устройство контроля непрерывности нулевого проводника в воздушных линиях 0,4 кВ / Д.А. Апаров, А.И. Сидоров, В.А. Петров, В.В. Дружинин. – № 2002127852/28; заявл. 17.10.2002; опубл. 10.06.2004. – 5 с.

31 Пат. № 2273936 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 5/12. Устройство защитного отключения / Е.В. Халин, С.И. Коструба, Д.С. Стребков. – № 2004137355/09; заявл. 22.12.2004; опубл. 10.04.2006. – 4 с.

32 Пат. № 2295186 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/00. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ и устройство для его осуществления / И.Ф. Суворов, К.С. Сережин, В.В. Гальцев, А.И. Сидоров – № 2005140871/09; заявл. 26.12.2005; опубл. 10.03.2007. – 7 с.

33 Пат. № 2356151 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/10. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ / К.С. Сережин, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров – № 2008105851/09; заявл. 15.02.2008; опубл. 20.05.2009. – 5 с.

34 Пат. № 2498322 Российская Федерация, МПК G 01 R 11/00. Счетчик электрической энергии с защитным отключением / В.И. Винокуров, В.Н. Зыков, А.В. Григорьева. – № 2012121080/28; заявл. 22.05.2012; опубл. 10.11.2013. – 3 с.

35 Пат. на п. м. № 94077 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 99/00. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывами фазных проводов / Н.М. Попов, А.Н. Клочков. – № 2009148481/22; заявл. 25.12.2009; опубл. 10.05.2010. – 4 с.

36 Пат. на п. м. № 124069 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/16. Устройство защитного отключения электроустановки от сети переменного тока с тремя фазными проводами и нулевым проводом / В.С. Шкрабак, В.П. Сакулин, А.Е. Суетин и др. – № 2012115812/07; заявл. 19.04.2012; опубл. 10.01.2013. – 5 с.

37 Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинова, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов.; под ред. И.П. Крюčkова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с

38 Пособие по проектированию городских и поселковых электрических сетей (к ВСН 97–83) / Гипрокоммунэнерго, МНИИТЭП. – М.: Стройиздат, 1987. – 208 с.

39 Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок [Текст]: утв. приказом Минтруда РФ от 24.07.2013 № 328н. – Екатеринбург: ИД «УралЮрИздат», 2014. – 240 с.

40 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России [Текст]. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003. – 320 с.

41 Правила устройства электроустановок. – 7-е издание. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2008. – 704 с.

42 Сагутдинов, Р.Ш. Защита электрических сетей 0,38 кВ при обрыве проводов / Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Красников, В.Г. Головацкий // Электрические станции. – 1982. – № 7. – С. 56–58

43 Сакара, А.В. Методические рекомендации по проведению испытаний электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей [Текст] / А.В. Сакара. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 216 с.

44 Селивахин, А.И. Защита воздушной линии электропередачи 0,38 кВ от обрыва фазного провода / А.И. Селивахин, В.П. Кобазев, Х.М. Желиховский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 7. – С. 55–57.

45 Спеваков, П.И. Выбор сечения нулевых проводов в четырёхпроводных сетях / П.И. Спеваков // Промышленная энергетика. – 1961. – № 3. – С. 46–52.

46 Спеваков, П.И. К проектированию сетей зануления в силовых установках / П.И. Спеваков // Электричество. – 1939. – № 8. – С. 69.

47 Спеваков, П.И. Определение расчётного сопротивления петли зануления / П.И. Спеваков // Электричество. – 1965. – № 9. – 71–75.

48 Спеваков, П.И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В [Текст] / П.И. Спеваков – М.: Энергия, 1971. – 86 с.

49 Счётчик активной и реактивной электрической энергии трёхфазный СЕ 303 / Руководство по эксплуатации [Текст]. – Ставрополь: ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», 2012. – 65 с.

50 Счётчик электрической энергии с защитным отключением Пат. 2498322 Российской Федерации, МПК G 01R 11/00 / В.И. Винокуров, В.Н. Зыков, А.В. Григорьева. – № 2012121080/28; заявл. 22.05.2012; опубл. 10.11.2013. – 3 с.

51 Счётчик электрической энергии серии NP5 «Матрица» / Описание функций [Текст]. – М.: ООО «Матрица», 2010. – 41 с.

52 Счётчики электрической энергии / Каталог [Текст]. – Ставрополь: ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», 2013. – 32 с.

53 Счётчики электрической энергии многофункциональные СЭТ-4ТМ.03М, СЭТ-4ТМ.02М / Руководство по эксплуатации [Текст]. – Нижний Новгород: ОАО «ННПО имени М.В. Фрунзе», 2014. – 90 с.

54 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

55 Устройство защитного отключения [Текст]: пат. № 2273936 Рос. Федерация: МПК Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 5/12 / Е.В. Халин, С.И. Коструба, Д.И. Скребков. – № 2004137355/09; заявл. 22.12.04; опубл. 10.04.06. – 4 с.

56 Фетисов М. В. Исследование защиты от обрывов проводов воздушной линии напряжением 380 В: дипломный проект. – Челябинск: ЮУрГУ, 2015. – 130 с.

57 Херсонский, А.С. Приставка к автоматическим выключателям для защиты сельских электросетей 0,4 кВ / А.С. Херсонский, Я.М. Фексон // Электрические станции. – 1977. – № 10. – С. 69–70.

58 Херсонский, А.С. Селективная защита от однофазных коротких замыканий ФО-0,4 для распределительных сетей 0,4 кВ / А.С. Херсонский, А.Ш. Левин, Я.М. Фексон // Электрические станции. – 1975. – № 3. – С. 47–48.

59 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

60 Halevidis, C.D. Proposal of a protection method against probable consequences to humans and the environment from short-circuit or abruption of a low-voltage distribution line conductor. – IET Generation, Transmisson & Distribution, 2010, Vol. 4, Iss. 7, pp. 793–800.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А

Статья в сборнике «Наука ЮУрГУ: Материалы 69-й научной конференции. Секции технических наук. 2016 г.»

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЩИТ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В ОТ ОБРЫВОВ ПРОВОДОВ И ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

*А.М. Ершов, С.Е. Скоринов*

В статье проведён анализ авторских свидетельств и патентов на изобретения и представлена классификация устройств защиты воздушных линий напряжением 380 В (ВЛ-380 В) от обрывов проводов и однофазных замыканий.

Для построения защиты ВЛ-380 В используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжений и напряжений фаз относительно земли; изменения составляющих обратной и нулевой в напряжениях и токах электрической сети; наложение токов промышленной частоты и др.

Ключевые слова: воздушная линия напряжением 380 В; обрывы нулевого и фазных проводов; однофазные короткие замыкания.

Обрывы проводов и однофазные короткие замыкания в воздушных линиях электрических сетей напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью являются одним из наиболее частых видов повреждений. По разным источникам информации они составляют от 40 до 62 % от общего числа повреждений ВЛ-380 В. Проведём классификацию устройств защиты воздушных линий напряжением 380 В от обрывов нулевого и фазных проводов, а также однофазных коротких замыканий.

*При возникновении продольной и поперечной несимметрии электрической сети, например, при обрывах нулевого и фазных проводов воздушной линии электропередачи, а также при однофазных коротких замыканиях меняются напряжения фаз относительно нулевого провода, перераспределяются токи в электрической сети и одновременно появляются симметричные составляющие напряжений и токов обратной и нулевой последовательности [1–3]. Информация об указанных изменениях может быть использована при построении защит электрической сети от возникающих несимметричных режимов работы.*

**Токовые защиты, реагирующие на токи, протекающие по фазным проводам воздушной линии.** Токовые защиты ВЛ-380 В, построенные с использованием плавких предохранителей и автоматических выключателей, устанавливаемых в начале ВЛ и реагирующих на увеличение токов, протекающих по нулевому и фазным проводам, предназначены для защиты электрической сети от однофазных или многофазных токов короткого замыкания [3, 4]. Но, в связи с быстрым снижением токов короткого замыкания по длине ВЛ, эти защитные аппараты имеют ограниченную зону защиты, не превышающую 250–350 м



При обрывах проводов ток повреждённой фазы или нулевого провода становится равным нулю, а токи в оставшихся проводах перераспределяются, но не превышают токов срабатывания плавких предохранителей и автоматических выключателей. Таким образом, эти защитные аппараты принципиально не могут обеспечить защиту ВЛ-380 В от обрывов проводов.

**Защиты, построенные на сравнении двух токов**, протекающих по проводнику, соединяющему заземляющее устройство трансформаторной подстанции и нейтраль вторичной обмотки трансформатора, и нулевому рабочему проводу, или двух токов, протекающих на разных участках нулевого рабочего провода [5, 6]. Известно, что в нормальном режиме работы сети при любой несимметрии нагрузок линии ток, протекающий по нулевому проводу, всегда больше тока, протекающему по заземлению нейтрали трансформатора. При обрыве нулевого провода это соотношение меняется, что и используется для обнаружения аварийной ситуации.

**Защиты, реагирующие на изменение напряжений фаз относительно нулевого провода или земли.** При обрыве фазного провода, когда напряжение на фазе становится ниже уставки (практически равно нулю), формируется логический сигнал, который анализируется и, если необходимо, отключает потребителя в конце линии с указанием поврежденной фазы [7–9].

Отключение потребителей при повышении или понижении фазных напряжений питающей электрической сети за допустимые пределы могут выполнять современные микропроцессорные счетчики за счет использования внутреннего реле управления нагрузкой РУН [10]. Данная дополнительная функция счетчика может быть использована и для определения обрывов проводов.

Устройство [11], установленное в конце линии и содержащее два реле, подключенные на два линейных напряжения, и одно реле, подключенное между фазным и нулевым проводами, выявляет обрывы фазных и нулевого проводов ВЛ-380 В, по каналу GSM передаёт сигнал в питающую трансформаторную подстанцию, где воздействует на независимый расцепитель автоматического выключателя и отключает ВЛ-380 В с оборванными проводами.

**Защиты, построенные на использовании напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательности.** При обрыве фазного провода у потребителя появляются токи обратной последовательности, которые можно использовать, например, для защиты электродвигателя [12]. С помощью фильтра токов обратной последовательности выявляют их изменение и при превышении уставки, электродвигатель отключают от сети. Этот вид защиты может быть использован только для защиты отдельного электроприёмника, питающегося от повреждённой ВЛ. Защиту линии осуществить с помощью него нельзя.

При обрыве фазы возникает несимметрия напряжений, которая может быть обнаружена с помощью фильтра напряжений обратной последовательности [13, 14]. В устройствах защиты [15–18] фильтр напряжения обратной последовательности выявляет обрыв фазного провода, подаёт команду на включение короткозамыкателя, создающего трёхфазное короткое замыкание в конце линии, которое отключается токовыми защитами, установленными в начале ВЛ-380 В.

**Защиты, построенные на использовании дифференциальных токов.** Для выявления повреждений электрической сети напряжением 380 В широко используют

дифференциальные токи, получаемые в результате векторного суммирования различных сочетаний токов четырёхпроводной и пятипроводной электрической сети.

1 Векторная сумма трёх фазных токов четырёхпроводной воздушной линии представляет дифференциальный ток, который при отсутствии сопротивлений повторных заземлений нулевого провода и сопротивления заземляющего устройства у потребителя равен току, протекающему по нулевому проводу, равному току нулевой последовательности, возникающему в трёхфазной системе относительно нулевого провода.

При симметричной нагрузке воздушной линии дифференциальный ток и ток в нулевом проводе равны нулю, а при неравенстве однофазных нагрузок могут достигать половины максимального фазного тока нагрузки ВЛ.

При возникновении обрыва фазного провода ВЛ существенно изменяется распределение токов в электрической сети, в частности, ток нагрузки повреждённой фазы становится равным нулю. При симметричной нагрузке и отсутствии повторных заземлений нулевого провода дифференциальный ток ВЛ будет равен току фазы, в которой произошёл обрыв провода.

При однофазном коротком замыкании на нулевой провод характер распределения токов в электрической сети существенно не меняется, т. к. сопротивление току однофазного короткого замыкания соответствует мощной однофазной нагрузке. Следовательно, ток однофазного короткого замыкания появляется в токе повреждённой фазы и дифференциальном токе ВЛ.

Наличие повторных заземлений нулевого провода ВЛ и заземляющих устройств у потребителей обуславливает стекание с нулевого провода ВЛ и создаёт небаланс токов для трёхфазной четырёхпроводной воздушной линии. От несимметрии однофазных нагрузок и небаланса токов должны быть отстроены защиты ВЛ от ОКЗ. Уставку по току предлагается принимать равной 70 % расчётного тока одной фазы. Данный дифференциальный ток используется в ряде устройств защиты [4, 19–22].

2 Векторная сумма четырёх токов четырёхпроводной воздушной линии представляет дифференциальный ток, который при отсутствии сопротивлений повторных заземлителей и сопротивления заземляющего устройства у потребителя, равен току, протекающему на участке схемы между заземляющим устройством ТП и точкой соединения нулевого провода с нейтралью трансформатора. Этот дифференциальный ток используется в устройствах защитного отключения (УЗО), в частности в [23], и может быть использован в качестве информации для выявления однофазного замыкания на землю, например, при обрыве и падении на землю фазного провода, а также каких-либо утечек изоляции с фаз на землю, например, при загрязнении изоляторов ВЛ.

3 Для выявления обрывов фазных и нулевого проводов может быть использовано измерение дифференциальных токов в пятипроводной электрической сети напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью [24, 25]. Данное устройство предполагает использование восьми конденсаторов, включенных в разных точках электрической сети, и измерение дифференциального тока (векторной суммы токов, протекающих по этим восьми конденсаторам). В результате можно выявлять различные варианты обрывов проводов электрической сети. Однако этот способ реализуем только в пятипроводной электрической сети с разделёнными нулевым

рабочим проводом N и нулевым защитным проводником PE, т. е. в сети с применением системы заземления TN–S. Реально все воздушные линии напряжением 380 В работают с совмещённым PEN-проводом, т. е. в сети с применением системы заземления TN–C.

**Защиты, построенные на использовании наложенных токов.** Для защиты ВЛ-380 В от обрыва фазного провода может быть использовано устройство, основанное на применении источника оперативного тока, устанавливаемого в конце ВЛ и состоящего из трёх цепочек «диод-резистор», и трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП), устанавливаемого в начале ВЛ для выявления оперативного тока [26–29]. При нормальном режиме работы импульсные сигналы, поступающие с RD-цепочек симметричны и сигнал на выходе ТТНП равен нулю, а при обрыве фазного провода симметрия импульсных сигналов нарушается, что выявляется с помощью ТТНП и обеспечивается срабатывание устройства защиты.

Одним из вариантов контроля целостности нулевого провода четырёхпроводной электрической сети является введение тока непромышленной частоты [30] или постоянного тока [31] в цепь нулевого провода, которые затем замыкаются по фазам электрической сети. При обрыве нулевого провода нарушается цепь прохождения этих токов по указанному контуру, что приводит к отключению автоматического выключателя, обесточивающего ВЛ.

Для выявления обрыва нулевого провода может быть использовано пропускание высокочастотных импульсов через нулевой провод и совокупность повторных заземлителей защищаемых линий [32].

**Защита, построенная на использовании широтно-импульсных сигналов,** которые поочередно подаются в разные фазы. В конце ВЛ на фазах установлены конденсаторы, которые отражают широтно-импульсные сигналы [33]. При нормальном режиме работы ВЛ возвращающийся сигнал имеет нарастающий фронт определённой длительности, при обрыве фазного или нулевого проводов сигнал не возвращается, а при коротком замыкании длительность сигнала максимальна. Соответствующим образом построенная измерительная и логическая части защиты позволяют выявлять указанные повреждения ВЛ.

### **Заключение**

1 Для построения защиты ВЛ-380 В используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжения и напряжений фаз относительно земли; изменения обратной и нулевой составляющих в напряжениях и токах электрической сети, наложение токов непромышленной частоты и др.

2 Для выявления режимов работы ВЛ-380 В используют следующие основные виды функциональных блоков: фильтры напряжений и токов обратной и нулевой последовательности; дифференциальные трансформаторы тока; частотные фильтры; блоки сравнения; логические схемы анализа режима.

### Библиографический список

1 Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей / А.М. Федосеев. – М. Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

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

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

4 Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

5 Пат. № 2230415 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 Н 5/10, G 01 R 31/02. Устройство контроля непрерывности нулевого проводника в воздушных линиях 0,4 кВ / Д.А. Апаров, А.И. Сидоров, В.А. Петров, В.В. Дружинин. – № 2002127852/28; заявл. 17.10.2002; опубл. 10.06.2004. – 5 с.

6 Пат. № 2356151 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/10. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ / К.С. Сережин, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров – № 2008105851/09; заявл. 15.02.2008; опубл. 20.05.2009. – 5 с.

7 А. с. № 815833 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от несимметричного режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 2775470/24-07; заявл. 05.06.1979; опубл. 23.03.1981, Бюл. № 11. – 3 с.

8 А. с. № 1023494 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16. Устройство для определения режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью / А.М. Ершов, О.А. Петров, Ю.В. Исаев. – № 3387655/24-07; заявл. 22.01.1982; опубл. 15.06.1983, Бюл. № 22. – 6 с.

9 А. с. № 1050031 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для определения режима электрической сети / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 3275380/24-07; заявл. 10.04.1981; опубл. 23.10.1983, Бюл. № 39. – 6 с.

10 Пат. № 2498322 Российская Федерация, МПК G 01 R 11/00. Счетчик электрической энергии с защитным отключением / В.И. Винокуров, В.Н. Зыков, А.В. Григорьева. – № 2012121080/28; заявл. 22.05.2012; опубл. 10.11.2013. – 3 с.

11 Halevidis, C.D. Proposal of a protection method against probable consequences to humans and the environment from short-circuit or abruptness of a low-voltage distribution line conductor. – IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, Vol. 4, Iss. 7, pp. 793–800.

12 А. с. № 714562 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/08. Устройство для токовой защиты участка трехфазной линии от обрыва одного из фазных проводов / В.И. Сукманов, И.Г. Беляков, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов, Р.Ш. Сагаутдинов. – № 2585953/24-07; заявл. 03.03.1978; опубл. 05.02.1980, Бюл. № 5. – 3 с.

13 Пат. на п. м. № 94077 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 99/00. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывами фазных проводов / Н.М. Попов, А.Н. Клочков. – № 2009148481/22; заявл. 25.12.2009; опубл. 10.05.2010. – 4 с.

14 Клочков, А.Н. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода / А.Н. Клочков // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 1. – С. 221–223.

15 А. с. № 884024 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной линии напряжением до 1000 В от обрыва фазных проводов / Р.Ш. Сагаутдинов,

В.И. Сукманов, В.И. Красников. – № 2895360/24-07; заявл. 19.03.1980; опубл. 23.11.1981, Бюл. № 43. – 3 с.

16 Сагутдинов, Р.Ш. Защита электрических сетей 0,38 кВ при обрыве проводов / Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Красников, В.Г. Головацкий // Электрические станции. – 1982. – № 7. – С. 56–58

17 А. с. № 995190 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной линии напряжением до 1000 В от обрыва фазных проводов / Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Красников, В.Г. Головацкий. – № 3317197/24-07; заявл. 17.07.1981; опубл. 07.02.1983, Бюл. № 5. – 3 с.

18 А. с. № 1210173 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от обрыва фазного провода в электрических сетях напряжением 0,38 кВ / Р.Ш. Сагутдинов, В.П. Кобазев. – № 3765590/24-07; заявл. 04.07.1984; опубл. 07.02.1986, Бюл. № 5. – 5 с.

19 Херсонский, А.С. Селективная защита от однофазных коротких замыканий ФО-0,4 для распределительных сетей 0,4 кВ / А.С. Херсонский, А.Ш. Левин, Я.М. Фексон // Электрические станции. – 1975. – № 3. – С. 47–48.

20 Херсонский, А.С. Приставка к автоматическим выключателям для защиты сельских электросетей 0,4 кВ / А.С. Херсонский, Я.М. Фексон // Электрические станции. – 1977. – № 10. – С. 69–70.

21 А. с. № 180238 СССР, МПК Н 02 d. Устройство для селективной защиты от утечек сетей с изолированной нейтралью / Р.А. Богданов. – № 852785/24-07; заявл. 16.08.1963; опубл. 21.03.1966, Бюл. № 7. – 2 с.

22 А. с. № 702449 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от повреждения нескольких трехфазных потребителей / Н.М. Попов. – № 2617338/24-07; заявл. 12.05.78; опубл. 05.12.79, Бюл. № 45. – 3 с.

23 Пат. на п. м. № 124069 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/16. Устройство защитного отключения электроустановки от сети переменного тока с тремя фазными проводами и нулевым проводом / В.С. Шкрабак, В.П. Сакулин, А.Е. Суетин и др. – № 2012115812/07; заявл. 19.04.2012; опубл. 10.01.2013. – 5 с.

24 Пат. № 2273936 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 5/12. Устройство защитного отключения / Е.В. Халин, С.И. Коструба, Д.С. Стребков. – № 2004137355/09; заявл. 22.12.2004; опубл. 10.04.2006. – 4 с.

25 Коструба, С.И. Человека защитит УЗО при авариях на воздушных линиях электропередачи / С.И. Коструба // Новости электротехники. – 2004. – № 1 (25).

26 А. с. № 997164 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/17. Устройство для защиты воздушной линии электропередачи от обрыва фазного провода / Х.М. Желиховский, В.П. Кобазев, В.Е. Матвиенко, С.Ф. Капштык. – № 2928145/24-07; заявл. 22.05.1980; опубл. 15.02.1983, Бюл. № 6. – 3 с.

27 А. с. № 1035715 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты линии электропередачи с ответвлениями от обрыва фазных проводов / Х.М. Желиховский, В.П. Кобазев. – № 3410805/24-07; заявл. 24.03.1982; опубл. 15.08.1983, Бюл. № 30. – 3 с.

28 А. с. № 1206873 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты воздушной линии электропередачи от обрыва проводов / В.П. Кобазев, Р.Ш. Сагутдинов,

А.И. Селивахин, Х.М. Желиховский. – № 3717476/24-07; заявл. 02.04.1984; опубл. 23.01.1986, Бюл. № 3. – 3 с.

29 Селивахин, А.И. Защита воздушной линии электропередачи 0,38 кВ от обрыва фазного провода / А.И. Селивахин, В.П. Кобазев, Х.М. Желиховский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 7. – С. 55–57.

30 А. с. № 854249 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты электроустановки от обрыва нулевого провода в сети с глухо заземленной нейтралью / Э.Г. Краус, Б.Л. Геллер. – № 2842892/07; заявл. 22.11.1979; опубл. 07.05.1992, Бюл. № 17. – 3 с.

31 А. с. № 845115 СССР, М. Кл.<sup>3</sup> G 01 R 27/20. Устройство для контроля целостности заземляющей цепи передвижных электроустановок / Ю.В. Ситчихин, А.И. Сидоров. – № 2792737/18-21; заявл. 09.07.1979; опубл. 07.07.1981, Бюл. № 25. – 2 с.

32 Пат. № 2295186 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/00. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ и устройство для его осуществления / И.Ф. Суворов, К.С. Сережин, В.В. Гальцев, А.И. Сидоров – № 2005140871/09; заявл. 26.12.2005; опубл. 10.03.2007. – 7 с.

33 А. с. № 1417097 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты линии электропередачи / В.А. Андреев, И.О. Карпов, А.Л. Дубов, А.Л. Буймистер. – № 4181207/24-07; заявл. 12.01.1987; опубл. 15.08.1988, Бюл. № 30. – 2 с.

## Приложение Б

### Компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В

Исследованиям процессов, происходящих в электрических сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями, посвящено достаточно много работ, проведённых в разные периоды времени становления и развития распределительных сетей указанного напряжения.

Значительная часть этих работ была направлена на установление характерных признаков, присущих аварийным режимам и разработке на их основе средств защиты и повышения уровня электробезопасности.

Следует отметить, что на величину модулей и фаз напряжений, как фазных, так и линейных, а также токов и их распределение в электрической сети оказывают влияние множество факторов, таких как технические параметры понижающих трансформаторов, их внешние характеристики, параметры воздушных линий, величина и места расположения повторных заземлителей нулевого провода, сопротивления заземляющих устройств потребителей, степень загрузки фаз воздушной линии и их несимметрия, наличие разветвлённых параллельно работающих линий, распределение нагрузки вдоль линии и многое другое.

Запись уравнений состояний электрической сети с учётом всех указанных выше факторов и их аналитическое решение представляется довольно сложным и трудоёмким процессом. 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.

Поэтому известные устройства обнаружения аварийных режимов и защиты от них, разработанные ещё в прошлом столетии, не являются безупречными и на данном этапе развития техники полностью не решают проблему. Другими словами, решение данной технической задачи остаётся актуальным.

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

С целью проведения достаточно глубоких и всесторонних исследований влияния различных вышеуказанных факторов на величины токов и напряжений фаз

электрической сети, их симметричных составляющих, а также взаимной ориентации указанных величин на комплексной плоскости сотрудниками кафедр «Системы электроснабжения» и «Безопасность жизнедеятельности» была создана серия компьютерных моделей электрической сети с применением заземления TN-C, выполненных четырёхпроводными воздушными линиями напряжением 380 В. Модели созданы в программном комплексе Matlab с применением пакета Simulink.

Адекватность работы компьютерной модели подтверждена результатами прямых измерений в двух реальных электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями Центрального РЭС ПО «Челябинские городские электрические сети» и Еткульского РЭС ПО «Центральные электрические сети» [29]. Следует отметить, что проведение прямых измерений в разных электрических сетях возможно не во всех эксплуатационных режимах из-за их опасности для электрооборудования, а в отдельных случаях и для людей и животных. При использовании же компьютерной модели таких ограничений нет, что открывает широкие возможности для исследования поведения режимных параметров при независимом изменении нагрузок её отдельных фаз и других параметров, таких как величина сопротивлений заземляющих устройств подстанций, потребителей, повторных заземлителей ВЛ, обрывы нулевого и фазных проводов, замыканий фазных проводов между собой и каждого из них на нулевой провод, места возникновения в сети указанных видов повреждений, наличие параллельно работающих линий и т.д.

### ***Исследования на простейшей сети с одиночной воздушной линией с сосредоточенной нагрузкой в конце***

На рисунке Б.1 представлена принципиальная схема простейшей трёхфазной четырёхпроводной электрической сети, состоящей из трёхфазного источника  $G$ , трансформатора  $T$  типа ТМГ с номинальной мощностью  $S_{Т.Н} = 160$  кВА, одной четырёхпроводной воздушной линии протяжённостью 200 м с сечением проводов 35 мм<sup>2</sup> и нагрузкой в конце.

Сопротивление заземляющего устройства трансформаторной подстанции  $R_{ЗУ.ТП}$  принято равным 4 Ома, повторных заземлителей нулевого провода в начале и конце ВЛ соответственно  $R_{П1}$  и  $R_{П2}$  – по 28 Ом. Значения указанных сопротивлений в процессе исследований оставались неизменными. Сопротивление же заземляющего устройства у потребителя  $R_{ЗУ.П}$  изменялось с целью оценки его влияния на исследуемые режимные параметры, в частности, на напряжения фаз и их симметричные составляющие.

Так как конечной целью проводимых исследований является выявление характерных признаков режимов опасных для живых организмов (людей и животных), а также оборудования, на основе которых планируется создание устройств их опознавания, то исследованиями следует охватить все обозримые эксплуатационные режимы, в том числе и нормальные.



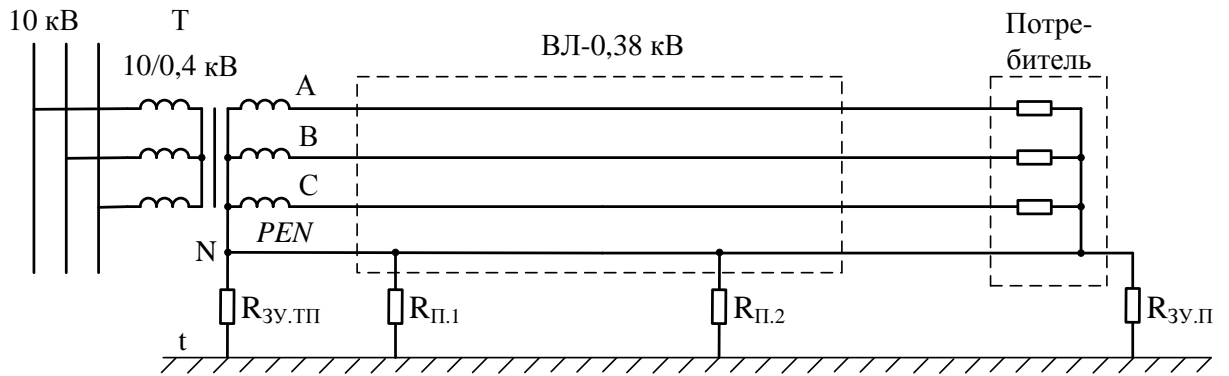


Рисунок Б.1 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В

Исследование распределения напряжений в разных точках электрической сети напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью при нормальных и возникновении несимметричных режимов работы проведено с использованием компьютерной модели, построенной на основе программного комплекса Matlab. На рисунке Б.2 представлен общий вид компьютерной модели простейшей сети, соответствующей электрической сети, показанной на рисунке Б.1. Компьютерная модель электрической сети с применением системы TN-C включает в себя следующие элементы: энергосистему; силовой трансформатор напряжением 10/0,4 кВ; одиночную, радиальную, четырехпроводную воздушную линию с повторными заземлителями нулевого провода; электрическую нагрузку [15, 59].

Обрывы фазных и нулевого проводов рассматривались в двух точках ВЛ: сразу после питающего трансформатора напряжением 10/0,4 кВ и перед потребителем. При этом учитывалось влияние следующих факторов:

1 Изменение сопротивления нагрузки  $Z_{\text{НАГР}} = R_{\text{НАГР}}$  в одной фазе или в двух фазах одновременно в диапазоне 0–100 % их расчётной мощности  $P_{\text{НАГР}}$ .

2 Изменение сопротивления заземляющего устройства  $R_{3y.п.}$ , установленного в нейтрали трёхфазной нагрузки потребителя в диапазоне от 1 Ома до  $\infty$ .

Для оценки состояния электрической сети проведено исследование изменения: напряжений фаз  $\underline{U}_{Ai.N}$ ,  $\underline{U}_{Bi.N}$ ,  $\underline{U}_{Ci.N}$  относительно нулевого провода N воздушной линии в разных точках ВЛ; напряжения несимметрии  $\underline{U}_{\text{НС}} = 3 \cdot \underline{U}_0$  трехфазной системы напряжений относительно нулевого провода; напряжения нулевой последовательности  $\underline{U}_0$ ; напряжения нулевого провода  $\underline{U}_{Ni.t}$  относительно земли.

Для определения структуры устройств распознавания (или выявления) ненормальных режимов работы электрической сети напряжением 380 В нужно, с одной стороны, знать параметры сети (напряжения и токи), на которые они должны реагировать, а с другой стороны, параметры, от которых следует отстраиваться.

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 нулевых проводов ВЛ;
- различные сочетания замыканий фазных проводов с нулевыми проводами ВЛ;

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

### *Описание моделируемой сети*

Компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В построена с глухо заземлённой нейтралью и применением системы TN-C.

Система TN-C – рабочий нулевой проводник N и нулевой защитный проводник PE этой системе совмещены в один провод. Самым большим недостатком является возможность появления фазного напряжения на корпусах электроустановок при аварийном обрыве нуля. Несмотря на это, данная система все ещё встречается.

В электроустановках с глухо заземленной нейтралью нейтраль генератора или трансформатора трехфазного переменного тока, средняя точка источника постоянного тока, один из выводов источника однофазного тока должны быть присоединены к заземлителю при помощи заземляющего проводника.

Искусственный заземлитель, предназначенный для заземления нейтрали, как правило, должен быть расположен вблизи генератора или трансформатора. Для внутрицеховых подстанций допускается располагать заземлитель около стены здания.

Если фундамент здания, в котором размещается подстанция, используется в качестве естественных заземлителей, нейтраль трансформатора следует заземлять путем присоединения не менее чем к двум металлическим колоннам или к закладным деталям, приваренным к арматуре не менее двух железобетонных фундаментов.

При расположении встроенных подстанций на разных этажах многоэтажного здания заземление нейтрали трансформаторов таких подстанций должно быть выполнено при помощи специально проложенного заземляющего проводника. В этом случае заземляющий проводник должен быть дополнительно присоединен к колонне здания, ближайшей к трансформатору, а его сопротивление учтено при определении сопротивления растеканию заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль трансформатора.

Во всех случаях должны быть приняты меры по обеспечению непрерывности цепи заземления и защите заземляющего проводника от механических повреждений.

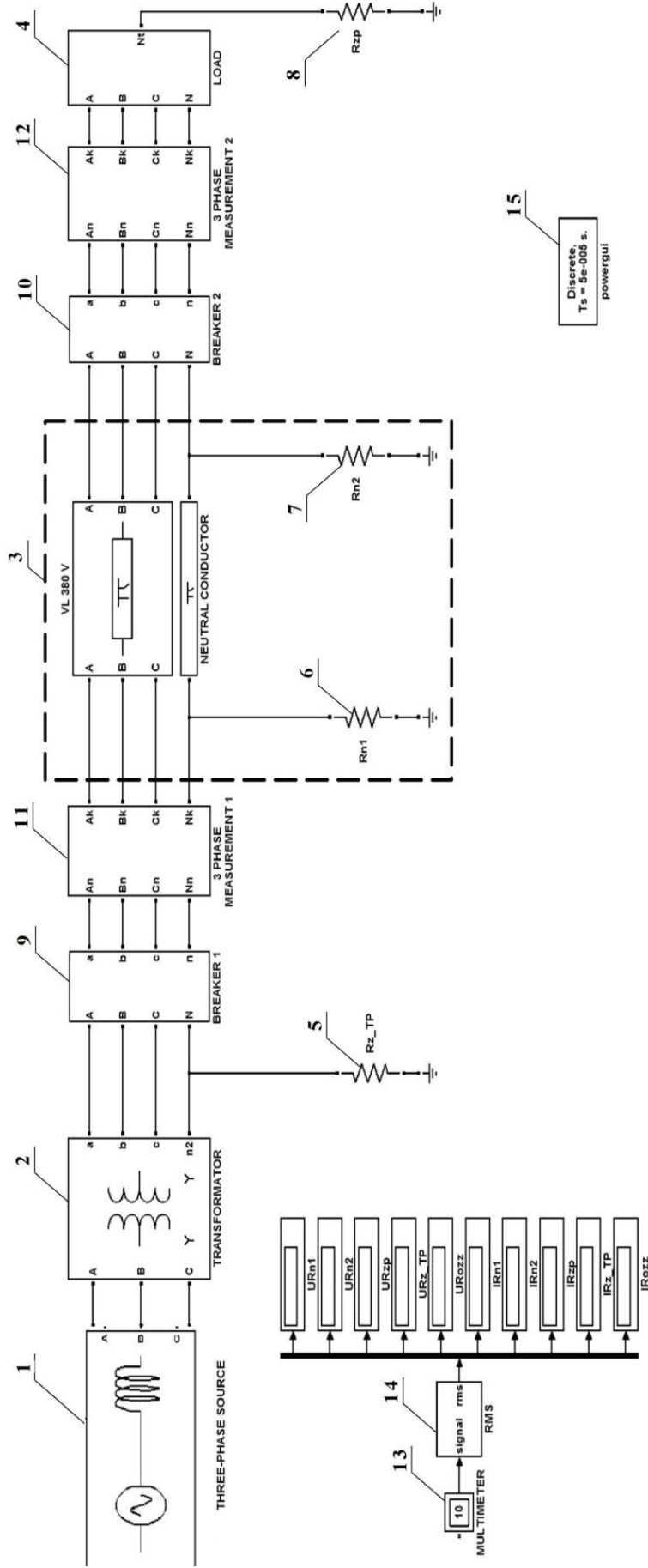


Рисунок Б.2 – Общий вид компьютерной модели электрической сети, выполненной в пакете Simulink:

1 – трехфазный источник электроэнергии напряжением 6–10 кВ; 2 – двухобмоточный трансформатор;  
 3 – модель четырехпроводной воздушной линии 380 В; 4 – электрическая нагрузка; 5, 6, 7, 8 – сопротивление соответственно заземляющего устройства ТП, вторных заземлителей линии и заземляющего устройства потребителя; 9, 10 – блок коммутационных аппаратов в начале и в конце воздушной линии;

11, 12 – измерительные комплексы; 13 – блок «Мультиметр»; 14 – блок, рассчитывающий действующее значение синусоидального сигнала; 15 – блок PowerGui

Если в PEN проводнике, соединяющем нейтраль трансформатора или генератора с шиной PEN распределительного устройства напряжением до 1 кВ, установлен трансформатор тока, то заземляющий проводник должен быть присоединен не к нейтрали трансформатора или генератора непосредственно, а к PEN проводнику, по возможности сразу за трансформатором тока.

В таком случае разделение PEN проводника на PE и N проводники в системе TN-S должно быть выполнено также за трансформатором тока. Трансформатор тока следует размещать как можно ближе к выводу нейтрали генератора или трансформатора.

Сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора, или выводы источника однофазного тока, в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. Это сопротивление должно быть обеспечено с учетом использования естественных заземлителей, а также заземлителей повторных заземлений PEN или PE проводника

ВЛ напряжением до 1 кВ при количестве отходящих линий не менее двух. Сопротивление заземлителя, расположенного в непосредственной близости от нейтрали генератора или трансформатора, или вывода источника однофазного тока, должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока.

При удельном сопротивлении земли  $\rho > 100$  Ом/м допускается увеличивать указанные нормы в 0,01  $\rho$  раз, но не более десятикратного.

На концах ВЛ или ответвлений от них длиной более 200 м, а также на вводах ВЛ к электроустановкам, в которых в качестве защитной меры при косвенном прикосновении применено автоматическое отключение питания, должны быть выполнены повторные заземления PEN проводника. При этом в первую очередь следует использовать естественные заземлители, например, подземные части опор, а также заземляющие устройства, предназначенные для грозовых перенапряжений.

Указанные повторные заземления выполняются, если более частые заземления по условиям защиты от грозовых перенапряжений не требуются.

Повторные заземления PEN проводника в сетях постоянного тока должны быть выполнены при помощи отдельных искусственных заземлителей, которые не должны иметь металлических соединений с подземными трубопроводами.

Общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе естественных) всех повторных заземлений PEN проводника каждой ВЛ в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

При удельном сопротивлении земли  $\rho > 100$  Ом/м допускается увеличивать указанные нормы в 0,01  $\rho$  раз, но не более десятикратного.

Параметры моделируемой системы приведены в табл. Б.1.

Таблица Б.1 – Параметры моделируемой системы

Элемент схемы	Параметр	Величина
Трансформатор ТМГ-160/10/0,4	Мощность	160,0 кВА
	Высокое напряжение	10,0 кВ
	Низкое напряжение	0,4 кВ
Воздушная линия АС-4х35 мм <sup>2</sup>	Длина линии	200,0 м
	Сечение проводов	35,0 мм <sup>2</sup>
	Количество проводов	4,0 шт
Сопротивления заземляющих устройств	ТП	4,0 Ом
	Повторное заземление	28,0 Ом
	Потребителя	1,0–∞ Ом
Предельная (номинальная) активная мощность потребителя $P_{Н.МАКС}$	Одной фазы	28,0 кВт
	Трёх фаз	72 кВт

***Исследование влияния несимметрии нагрузок потребителей на токи электрической сети в нормальном режиме её работы***

На компьютерной модели рассмотрим питание трех однофазных нагрузок, соединенных в звезду, по воздушной линии 380 В. Принципиальная схема показана на рисунке Б.3.

На схеме показаны: фазные напряжения на выводах силового трансформатора  $\underline{U}_{AT}$ ,  $\underline{U}_{BT}$ ,  $\underline{U}_{CT}$  относительно нулевого провода; напряжения фаз относительно нулевого провода до ( $\underline{U}_{A1}$ ,  $\underline{U}_{B1}$ ,  $\underline{U}_{C1}$ ) и после ( $\underline{U}_{A2}$ ,  $\underline{U}_{B2}$ ,  $\underline{U}_{C2}$ ) места возникновения несимметрии ВЛ; напряжения между нулевым проводом и землёй  $t$  на выводах трансформатора  $\underline{U}_{NT,t}$ , у места возникновения несимметрии со стороны источника питания  $\underline{U}_{N1,t}$  и на оборванном проводе со стороны потребителя  $\underline{U}_{N2,t}$ .

Будем изменять мощность однофазной нагрузки от 100% до 0%. Сначала мощности будем менять у нагрузки, подключенной на фазу С, а потом одновременно у нагрузок, питающихся по фазам В и С.

Измерения проводились при сопротивлении заземляющего устройства потребителя  $R_{з.п.}$ , равном 1; 30 и ∞ Ом.

Замеренные, в ходе моделирования, величины сведены в таблицы 2.1–2.2.

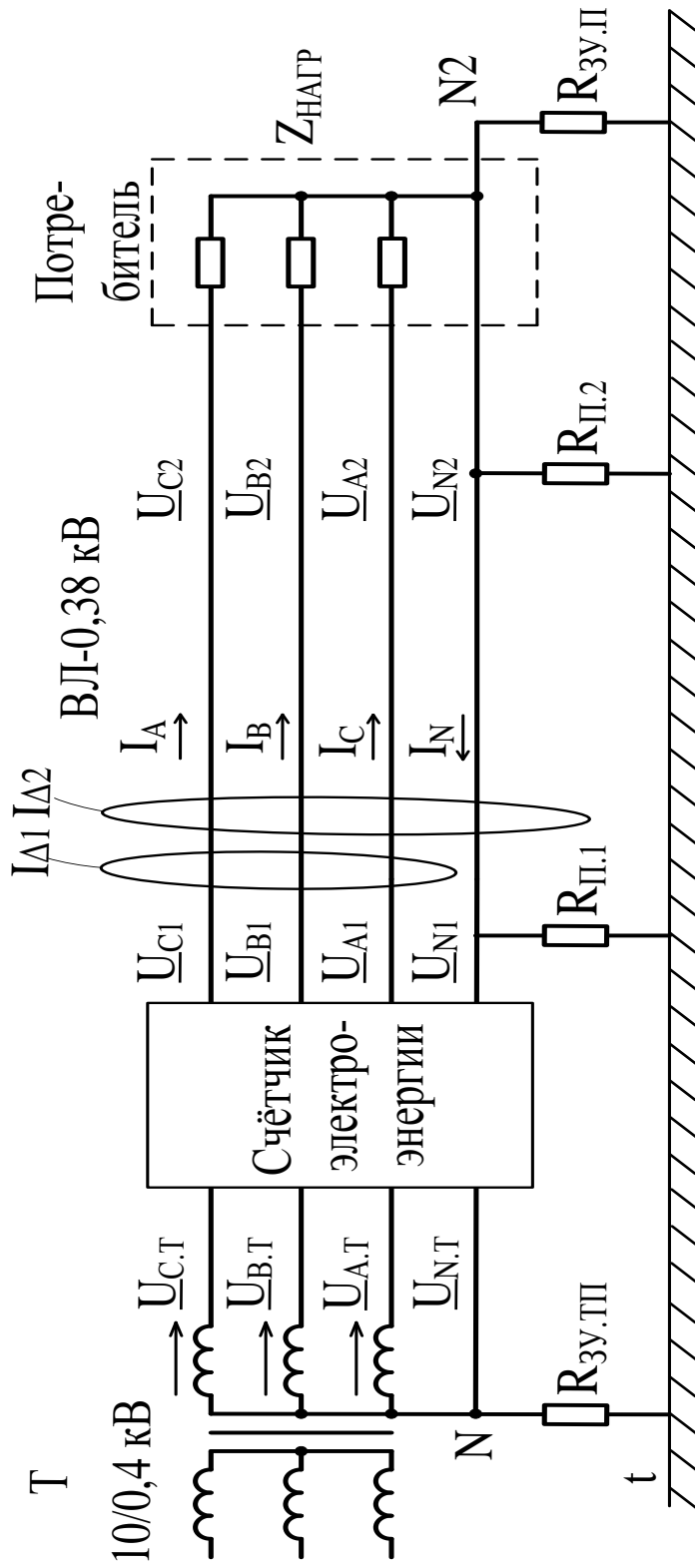


Рисунок Б.3 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В с воздушной линией электропередачи в нормальном режиме работы

### *Исследование на компьютерной модели токов электрической сети при обрывах фазных проводов*

На рисунке Б.4 приведена схема питания потребителей электроэнергией по воздушной линии напряжением 380 В. Рассмотрим работу ВЛ при обрыве фазного (ОФ) провода фазы А. Пунктирными линиями 1 и 2 обозначены два участка ВЛ (сечения 1 и 2) – до и после места возникновения несимметрии линии, остальные обозначения, как и в предыдущем пункте.

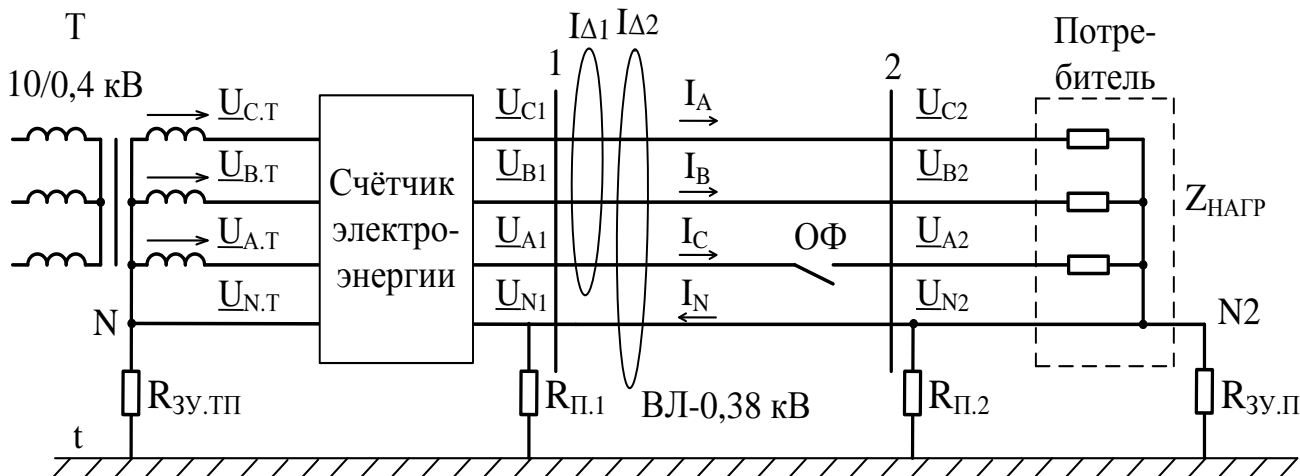


Рисунок Б.4 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В с воздушной линией электропередачи при обрыве фазного провода

Рассмотрим случай обрыва фазного провода фазы А в конце воздушной линии у потребителя, при трех значениях сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{3У.П}$  1; 30 и  $\infty$  Ом.

При моделировании производилось изменение мощности однофазных потребителей. Сначала изменялась активная мощность потребителя, присоединенного на фазу С. Изменение производилось от 100 % до 0 %. На втором этапе аналогичным образом одновременно изменялась активная мощность двух потребителей, присоединенных к фазам В и С. Результаты измерений сведены в таблицы 2.3 – 2.4, расположенные во втором разделе.

### *Исследование на компьютерной модели токов электрической сети при обрыве нулевого провода*

Было произведено моделирование воздушной линии напряжением 380 В с обрывом нулевого провода в этом случае линейные напряжения остаются неизменным, а фазные напряжения на однофазных потребителях изменяются обратно пропорционально их мощности.

На рисунке Б.5 приведена схема питания однофазных потребителей, соединенных в звезду, по воздушной линии 380 В с оборванным нулевым проводом (обозначения аналогичны рассмотренному выше режиму). Все повторные заземлители ВЛ находятся до места обрыва нулевого провода.

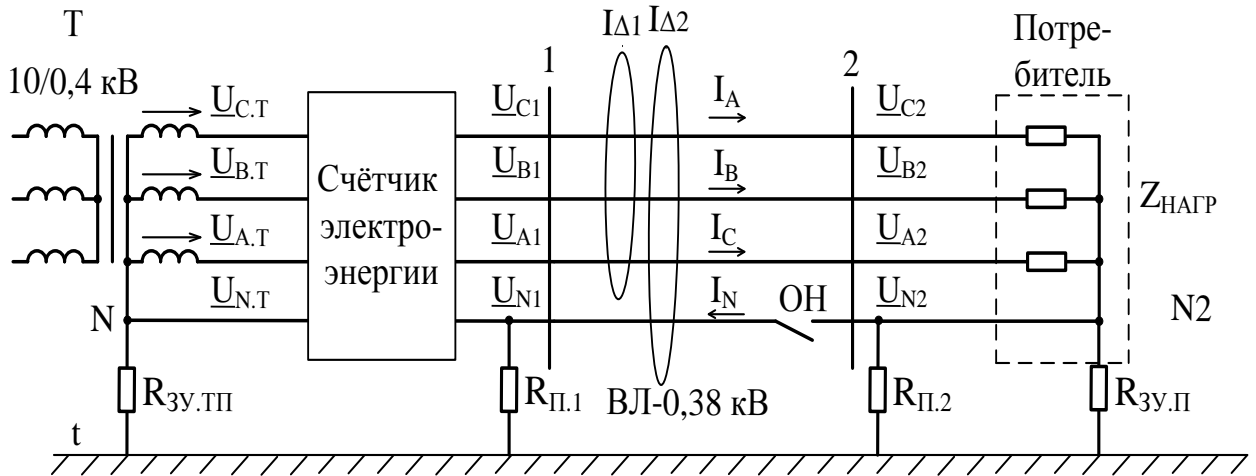


Рисунок Б.5 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В с воздушной линией электропередачи при обрыве нулевого провода

При моделировании производилось изменение мощности однофазных потребителей. Сначала изменялась активная мощность потребителя, присоединенного на фазу С. Изменение производилось от 100 % до 0 %. На втором этапе аналогичным образом одновременно изменялась активная мощность двух потребителей, присоединенных к фазам В и С. Сопротивление заземляющего устройства потребителя  $R_{ЗУ.П}$  принималось равным 1; 30 и  $\infty$  Ом. Результаты измерений сведены в таблицы 2.5 – 2.6, расположенные во второй разделе.



## Приложение В Физическая модель электрической сети напряжением 380 В

Принципиальная электрическая схема физической модели показана на рисунке В.1. Физическая модель напряжением 220 В представляет собой последовательно включенные:

- трансформатор (ТС-2,5/380/220) с заземляющим устройством трансформаторной подстанции ( $R_{ЗУ.ТП}$ );
- воздушную линию (ВЛ 220 В), разделенную на три равных участка, с повторными заземлителями в конце участка ( $R_{П1}$ ,  $R_{П2}$  и  $R_{П3}$ );
- регулируемую нагрузку чисто активного характера ( $R_H$ ) с заземляющим устройством нагрузки ( $R_{ЗУ.П}$ ).

Соотношения между параметрами оригинала и модели сетей представлены в таблице В.1.

Таблица В.1 - Соотношения между параметрами оригинала и модели

Сеть	Электрическая сеть 380 В	Физическая модель 220 В	Фактический к-т подобия, $m_{ФАКТ}$	Расчетный к-т подобия, $m_{РАСЧ}$
Силовой трансформатор				
Тип и марка	ТМГ	ТС		
$S_{Т.НОМ}$ , кВА	160	2,5	0,0156	0,0173
$X_T$ , Ом	0,04423	0,680	15,37	–
$R_T$ , Ом	0,0166	0,542	32,65	–
$Z_T$ , Ом	0,045	0,87	19,33	19,33
Четырехпроводная воздушная линия АС-3х70+1х70				
$X_{ВЛ}$ , Ом	0,0882	1,7050	19,33	19,33
$R_{ВЛ}$ , Ом	0,1287	2,4880	19,33	19,33
$Z_{ВЛ}$ , Ом	0,156	3,015	19,33	19,33
Напряжение питания				
$U_C$ , В	380	220	0,579	0,579
Электрическая нагрузка				
$P_H$ , кВт	57,85	0,80	0,0138	0,0173
$R_H$ , Ом	2,42	58	23,97	19,33
$I_H$ , А	87,65	2,1	0,0240	0,0299
Заземляющие устройства				
$R_{ЗУ.ТП}$ , Ом	4	77,32	19,33	19,33
$R_{П}$ , Ом	30	580	19,33	19,33
$R_{ЗУ.П}$ , Ом	10	193	19,33	19,33



На рисунке В.2 изображена принципиальная электрическая схема регулируемой нагрузки. Электрическая нагрузка представляет собой набор резисторов, включенных таким образом, чтобы получить семь ступеней регулирования. Фазный ток нагрузки можно изменять в диапазоне 0,18–2,19 А. Нагрузка регулируется независимо по каждой фазе в пределах 8,22–100 %, т.е. можно моделировать различные варианты её несимметрии. Параметры сопротивлений электрической нагрузки приведены в таблице В.2.

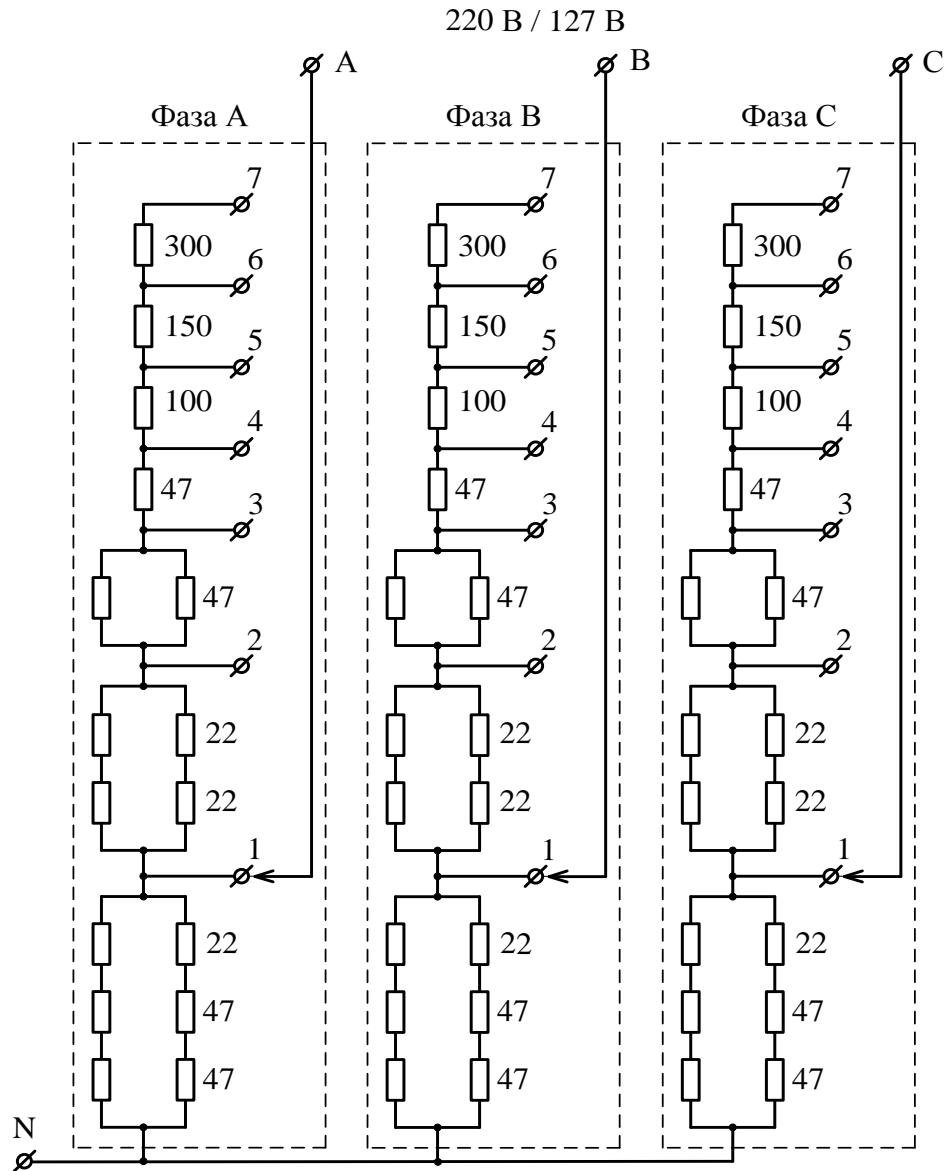


Рисунок В.2 – Принципиальная электрическая схема регулируемой нагрузки

Таблица В.2 – Параметры нагрузочных сопротивлений

$R_{i-i+1}$ , Ом	$R_{i-N}$ , Ом	$I_{i-N}$ , Ом	$I^2 \cdot R$ , Вт	Мощность электрической нагрузки		
				Положение переключателя	$P_{Н.Σ}$ , Вт	$P_{Н.Σ}$ , %
300,0	700,5	0,18	22,70	7 – N	68,1	8,2
150,0	400,5	0,32	41,01	6 – N	123,0	14,6
100,0	250,5	0,51	65,16	5 – N	195,5	23,3
47,0	150,5	0,85	108,74	4 – N	326,2	38,8
23,5	103,5	1,23	156,59	3 – N	462,2	55,7
22,0	80,0	1,59	202,25	2 – N	606,6	72,6
58,0	58,0	2,19	278,17	1 – N	834,2	100,0

Примечания к рисунку В.2 и таблице В.2:

1 На ступени (N – 1) использовано последовательно-параллельное соединение резисторов  $(47+47+22)/(47+47+22)$  Ом.

2 На ступени (1 – 2) использовано последовательно-параллельное соединение резисторов  $(22+22)/(22+22)$  Ом.

3 На ступени (2 – 3) использовано последовательно-параллельное соединение резисторов  $47/47$  Ом.

4 На последующих ступенях использованы одиночные резисторы.

5 Параметры резисторов, использованных в качестве нагрузки, приведены в таблице В.3.

Таблица В.3 – Данные резисторов

Тип	R, Ом	$P_{РАССЕЯНИЯ}$ , Вт
ПЭВ-100	47	100
ПЭВ-50	22	50
ПЭВ-100	100	100
ПЭВ-100	150	100
ПЭВ-100	300	100

Из таблицы В.3 видно, что диапазон регулирования нагрузочного тока составляет от 2,19 до 0,18 А или в процентах от 100 до 8,22, т.е. кратность регулирования равна 12,16.

В качестве измерительных приборов на физической модели применяются:

– самопишущий цифровой комплект, например типа «Ресурс-2UF2М», который позволяет производить запись измеряемых параметров с интервалами осреднения 0,02–3–60 с; фиксировать большое количество параметров, в частности, изменения во времени напряжений, токов, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности, симметричных составляющих напряжений и токов;

– токовые клещи с диапазоном измерения токов от 4 мА до 100 А, позволяющие измерять как очень малые токи, протекающие по повторным заземлителям, так и токи, протекающие по фазным и нулевому проводам моделируемой линии. Кроме

того, с помощью клещей можно замерять различные варианты дифференциальных токов, например типа KEW Snap 2432;

– мультиметры, например типа MASTECH MY-60.

Результаты исследований, с учетом обмоток трансформаторов и разных точек подключения прибора РЕСУРС, представлены в таблицах 2.7 –2.12, расположенных в разделе 2.

## Приложение Г Опытная электрическая сеть напряжением 380 В

### *Описание сети*

В электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями с неизолированными проводами в ходе эксплуатации возникают различного рода повреждения, которые обуславливают разные несимметричные режимы работы, среди которых наиболее часто встречающимися являются:

- однофазные короткие замыкания между фазным и нулевым проводами;
- однофазные замыкания на землю;
- обрывы фазного провода;
- обрывы нулевого провода.

Исследования процессов, протекающих при возникновении указанных несимметричных режимов, проводят с использованием математических, компьютерных, физических моделей [17, 18]. Однако адекватность полученных на моделях результатов можно проверить, только проведя соответствующие исследования в реальной электрической сети.

В тоже время анализ результатов, полученных в процессе исследований на компьютерной модели электрической сети, показывает, что реализация отдельных аварийных режимов в действующей электрической сети может создать опасную ситуацию для электроприёмников, населения и животных [17, 18, 21]:

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

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

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

Для проведения натуральных экспериментальных исследований на основании проекта, разработанного в Южно-Уральском государственном университете (НИУ),

филиал ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» построил реальную электрическую сеть напряжением 380 В на своём учебном полигоне, расположенном в селе Миасское, обслуживаемом Красноармейским РЭС ПО «Центральные электрические сети» [26]. Особенностью этой сети является то, что реальные бытовые и производственные электроприёмники заменены нагрузочными сопротивлениями. Такую сеть можно назвать «опытной электрической сетью напряжением 380 В». В дальнейшем этот термин мы будем использовать как при описании электрической сети напряжением 380 В, так и при представлении широкого круга экспериментальных исследований.

При выборе параметров опытной электрической сети, с одной стороны, были проанализированы мощности трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, сечения и протяженности воздушных линий напряжением 380 В, широко применяемых в сельской местности и в посёлках городского типа, а, с другой стороны, была поставлена задача, чтобы процессы, протекающие в электрической сети при моделировании всевозможных режимов их работы, были максимально приближены к реальным. Были приняты следующие параметры основного оборудования: мощность силового трансформатора 160 кВА, длина воздушной линии напряжением 380 В около 500 м, провод марки АС-4х35 мм<sup>2</sup>.

Опытная электрическая сеть напряжением 380 В построена на учебном полигоне, который используется для обучения производственного персонала «Челябэнерго» и проведения различного рода профессиональных соревнований как на уровне производственных электросетевых организаций «Челябэнерго», так и на уровне ОАО «МРСК Урала». На полигоне размещаются элементы подстанции 110/10 кВ, воздушных линий напряжением 110–10–0,38 кВ, различного рода распределительных устройств и т.д.

На рисунке Г.1 показана схема питания опытной электрической сети напряжением 380 В. Питание осуществляется последовательно:

- от подстанции «Миасская» напряжением 110/10 кВ, на которой установлены силовые трансформаторы типа ТМН мощностью 6300 кВА, фидер 14;

- по воздушной линии напряжением 10 кВ длиной 330 м, выполненной проводом АС-3х50 мм<sup>2</sup>, питается трансформаторная подстанция «Лесная». К этой же линии подключена комплектная трансформаторная подстанция КТП 933;

- на территории полигона построена комплектная трансформаторная подстанция «Лесная» тупикового типа КТП 160/10/0,4 с силовым трансформатором ТМГ мощностью 160 кВА, напряжением 10/0,4 кВ производства Минского трансформаторного завода. На стороне высшего напряжения ТП установлен разъединитель QS1 типа РЛНД-10, разрядники FV типа РВО-10, предохранители F1 типа ПКТ-10 с номинальным током плавких вставок 10 А;

- на стороне низшего напряжения ТП установлено распределительное устройство РУ-0,4 кВ, от которого непосредственно питается воздушная линия напряжением 380 В (рисунок Г.2);

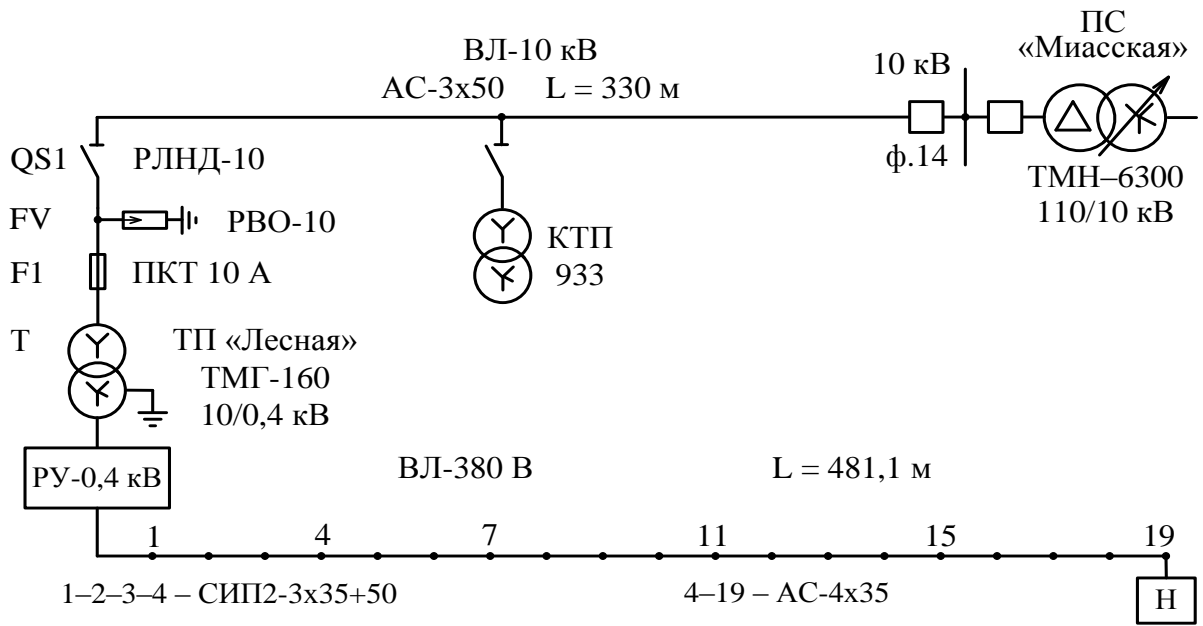


Рисунок Г.1 – Схема питания опытной электрической сети

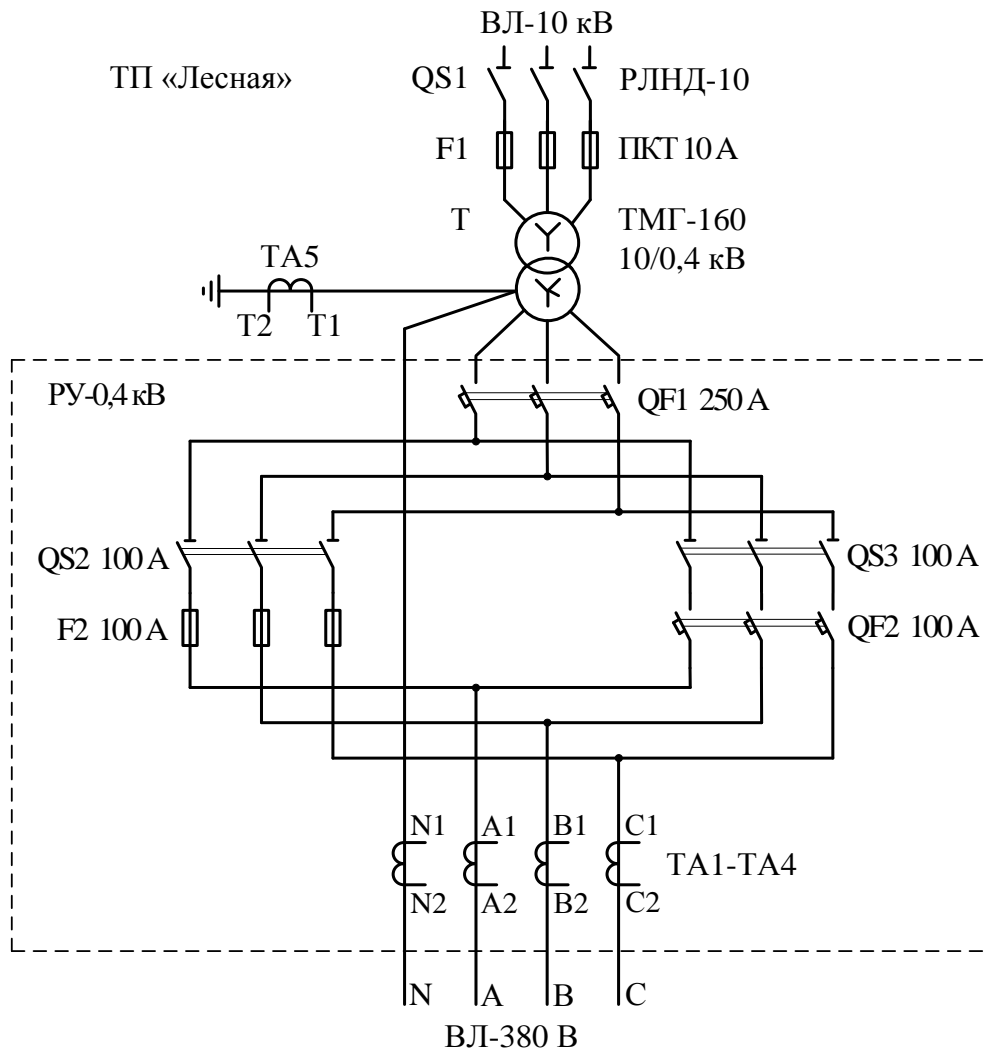


Рисунок Г.2 – Схема распределительного устройства РУ-0,4 кВ подстанции



– от воздушной линии напряжением 380 В предусмотрено питание потребителей электрической энергии, которые обозначены в виде нагрузки Н. Первые три пролёта ВЛ выполнены изолированным проводом СИП2-3х35+50 мм<sup>2</sup>, остальные 15 пролётов – неизолированным проводом АС-4х35 мм<sup>2</sup>. Общая длина ВЛ-380 В составляет 481,1 м.

План размещения опытной электрической сети на полигоне «Челябэнерго» представлен на рисунке Г.3. Часть линии с 4-й по 12-ю опоры имеет совместную подвеску с ВЛ-10 кВ полигона, остальная часть выполнена на отдельных опорах. Часть опор (4, 5, 6, 9, 10) по конструкции являются деревянными с железобетонными пасынками, остальные опоры – железобетонными. Фотографии опытной электрической сети показаны на рисунке Г.4: а – КТП «Лесная» с начальным участком ВЛ; б, в – середина и конец ВЛ; г – панель распределительного устройства 0,4 кВ КТП.

В таблице Г.1 приведена спецификация на оборудование, установленное распределительным устройством РУ-0,4 кВ трансформаторной подстанции «Лесная».

Таблица Г.1 – Спецификация

Обозначение	Оборудование	Параметры	Количество
QF1	Автоматический выключатель типа АЕ 2066-100	250 А	1
QS2, QS3	Рубильник	100 А	2
F2	Предохранитель типа ПН-2	100 А	3
QF2	Автоматический выключатель типа Compact NSX 100А	100 А	1
ТА1–ТА5	Трансформатор тока типа ТОП 0,66 кВ	200/5 А	5

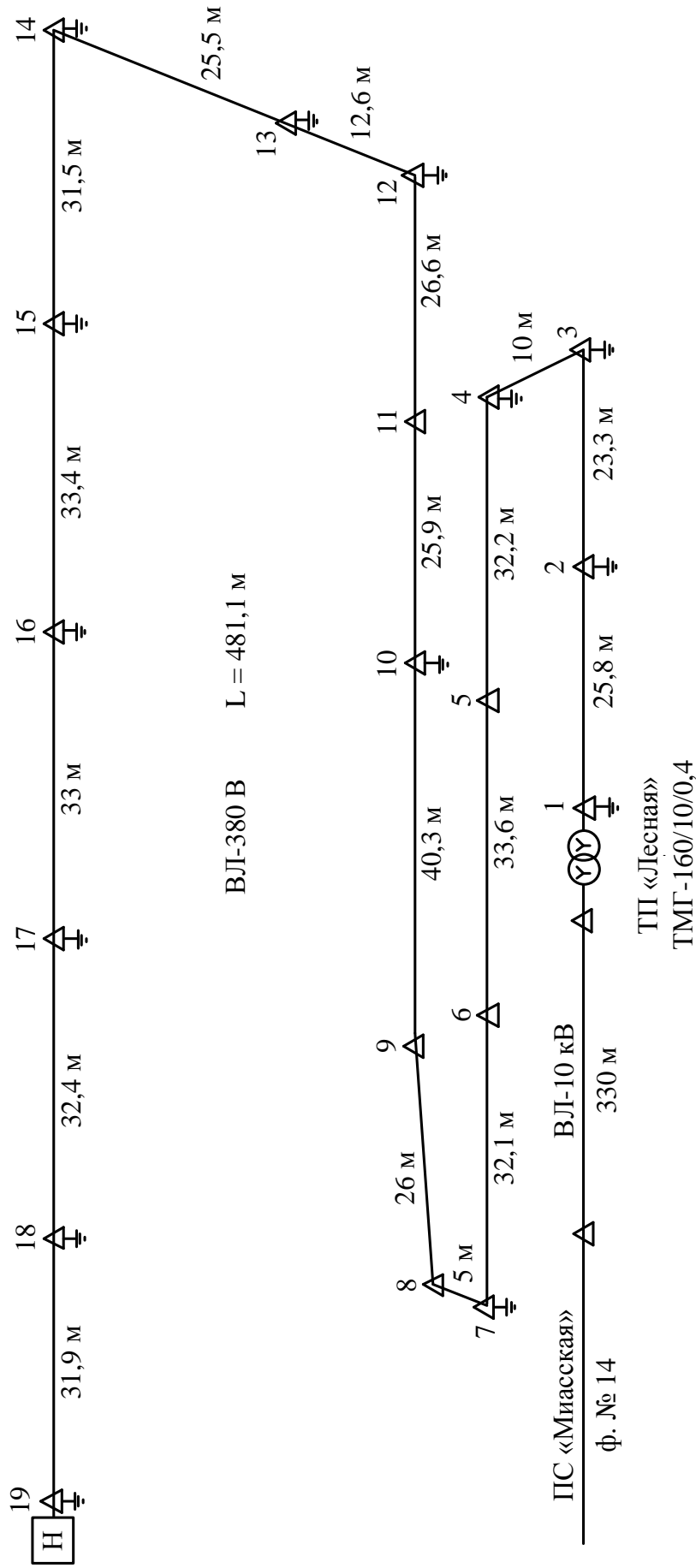
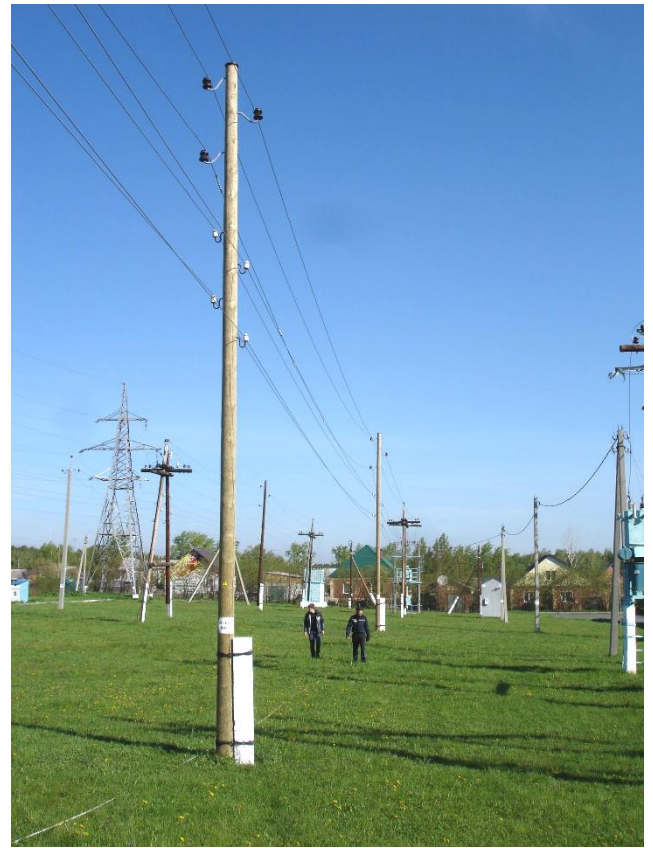


Рисунок Г.3 – План размещения опытной электрической сети напряжением 380 В на полигоне «Челябэнерго»



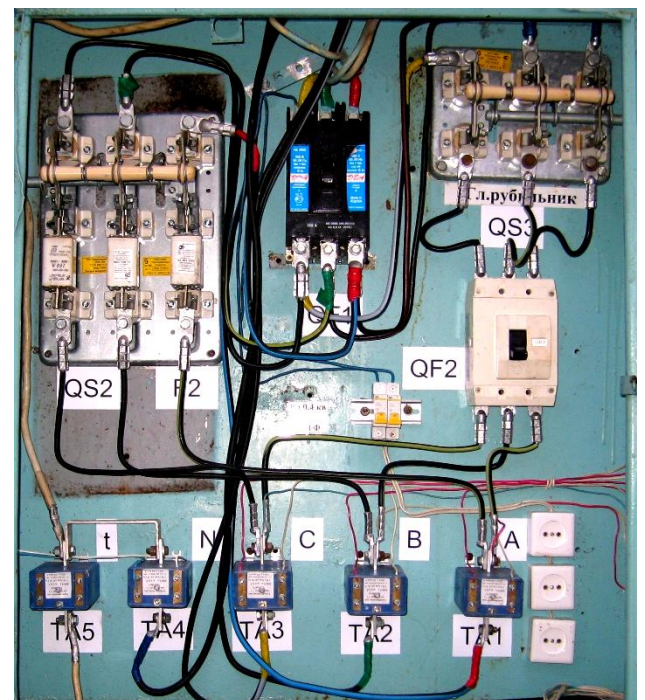
а)



б)



в)



г)

Рисунок Г.4 – Внешний вид опытной электрической сети напряжением 380 В

Схема распределительного устройства РУ-0,4 кВ разработана таким образом, чтобы она позволяла производить:

- исследования защитных характеристик как автоматических выключателей, так и плавких предохранителей, устанавливаемых в начале ВЛ-0,38 кВ. Предусмотрены два варианта питания – через рубильники QS2 и предохранители F2 либо рубильники QS3 и автоматический выключатель QF2. Автоматический выключатель QF1 выполняет функции вводного выключателя и предназначен для общей защиты РУ-0,4 кВ;

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

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

- подключения различного рода измерительных приборов.

Трёхфазная нагрузка Н1, имитирующая нагрузку потребителей электрической сети расположена в конце воздушной линии – около конечной опоры № 19 (рисунки Г.1 и Г.3). Принципиальная схема ячейки нагрузочных сопротивлений показана на рисунке Г.5. Здесь обозначено: QS4–QS7 – однофазные рубильники; QF4 – автоматический выключатель; микропроцессорный счётчик электрической энергии типа «Энергомера»; R1–R8 – нагрузочные сопротивления; ТА1–ТА6 – измерительные трансформаторы тока.

В качестве нагрузочных сопротивлений использованы сопротивления, применяемые в схемах пуска-торможения крановых двигателей постоянного тока. В зависимости от величины тока сопротивления выполнены из ленты или круглых проводников разного сечения. Для получения необходимых значений ступеней нагрузочных сопротивлений отдельные сопротивления соединены последовательно или параллельно и сгруппированы в девять блоков. На рисунке Г.6 показана подробная схема соединения нагрузочных сопротивлений.

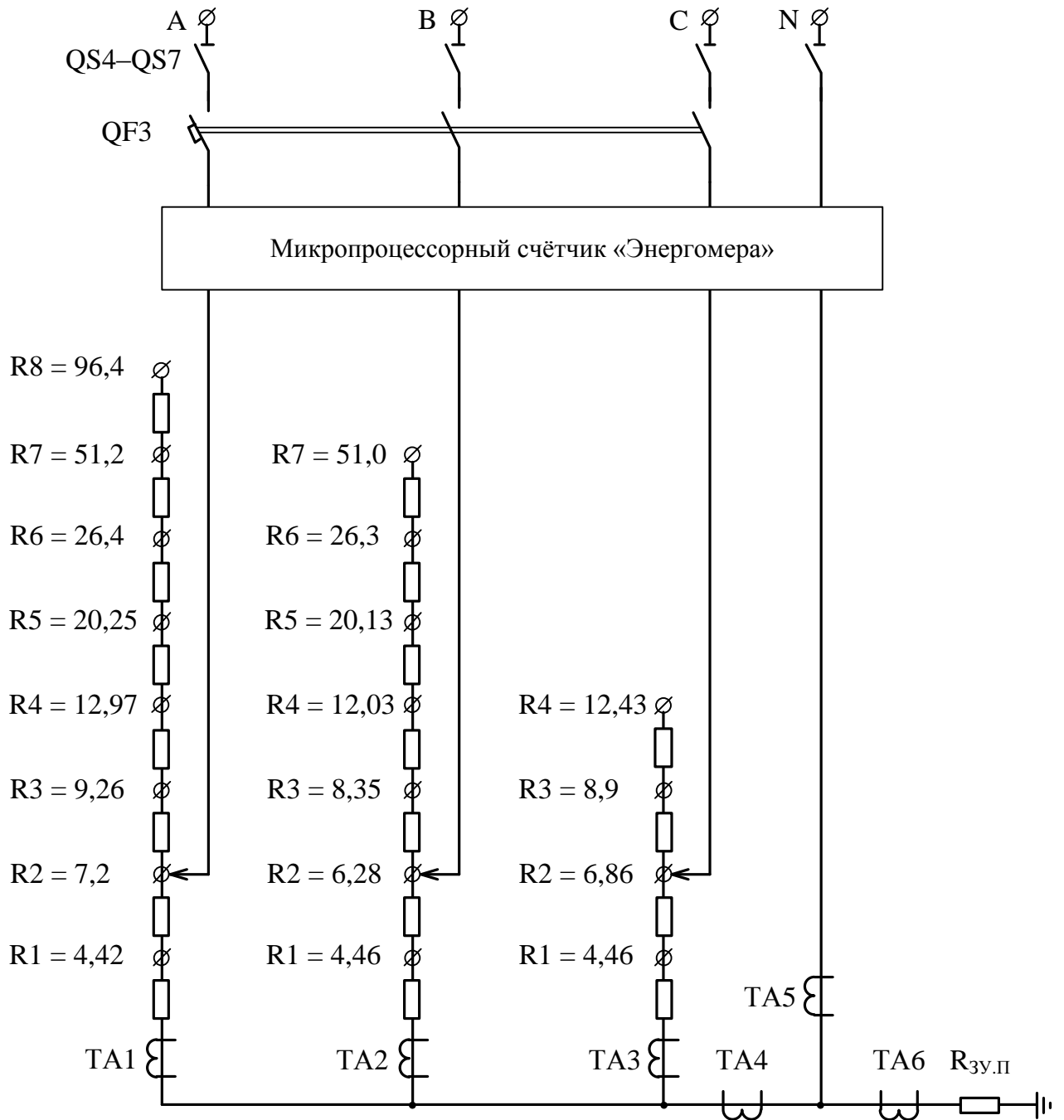


Рисунок Г.5 – Принципиальная схема ячейки нагрузочных сопротивлений

В таблице Г.2 представлены характеристики нагрузочных сопротивлений:

- распределение сопротивлений по ступеням R1–R8;
- по фазам сопротивления каждой ступени; сопротивления ступеней определены для холодного состояния резисторов;

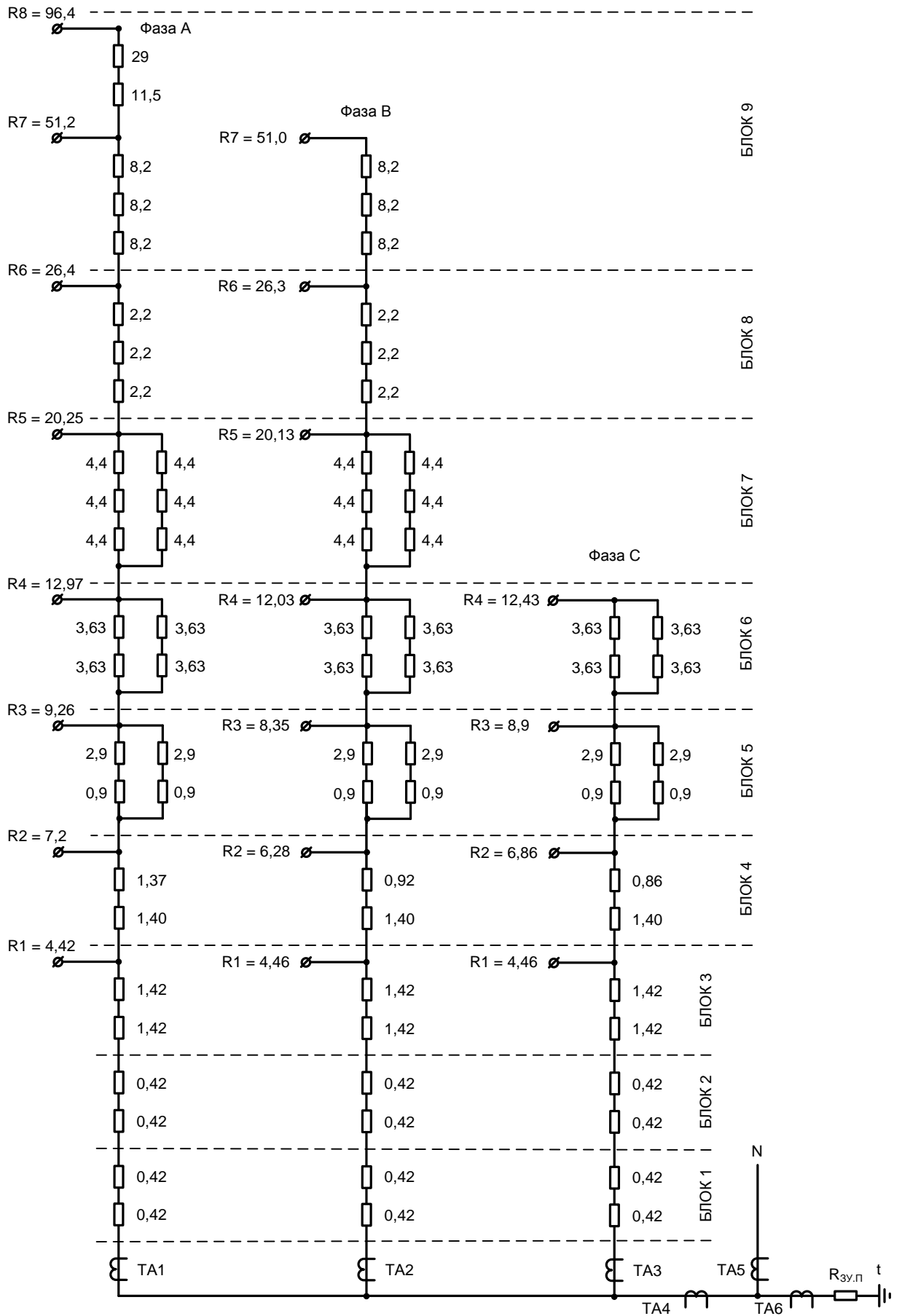


Рисунок Г.6 – Подробная схема соединения нагрузочных сопротивлений

– расчётные максимальные значения фазных токов  $I_{\Phi}$ , выделяемой фазной активной мощности  $P_{\Phi}$  и суммарной трёхфазной мощности  $P_{3,\Phi}$  каждой ступени; эти параметры рассчитаны, когда к ступени сопротивления прикладывается номинальное фазное напряжение  $U_{\Phi,Н} = 220$  В.

Таблица Г.2 – Параметры нагрузочных сопротивлений

№ ступени	Сопротивления ступеней нагрузочных сопротивлений, Ом			Расчётные значения при фазном напряжении $U_{\Phi,Н} = 220$ В		
	фаза А	фаза В	фаза С	фазного тока $I_{\Phi}$ , А	мощности фазы $P_{\Phi}$ , кВт	трёхфазной мощности, $P_{3,\Phi}$ , кВт
R1	4,42	4,46	4,46	49,3	10,85	32,55
R2	7,2	6,28	6,86	35,03	7,707	23,12
R3	9,26	8,35	8,9	26,35	5,8	1,74
R4	12,97	12,03	12,43	18,28	4,02	12,06
R5	20,25	20,13	–	10,93	2,4	–
R6	26,4	26,3	–	8,365	1,84	–
R7	51,2	51,0	–	4,313	0,95	–
R8	96,4	–	–	2,282	0,502	–

Из таблицы Г.2 видно, что в конце линии можно получить максимальную симметричную трёхфазную нагрузку  $P_{3,\Phi,МАКС} = 32,7$  кВт или максимальную однофазную –  $P_{\Phi,МАКС} = 10,9$  кВт. Минимальные нагрузки на двух фазах равны  $P_{\Phi,МИН} = 0,5$  кВт, т.е. можно получить диапазон регулирования нагрузки в конце линии в процентах от 4,63 до 100 % или кратность регулирования составляет 21,6.

Выполнение нагрузочных сопротивлений из ленточных и проволочных резисторов позволило выдерживать нагрузочные токи на различных ступенях в течение не менее 10–15 минут, что оказалось достаточным для проведения различных экспериментальных исследований и фиксации результатов исследований в опытной электрической сети.

Отметим, что в ходе моделирования различных режимов работы электрической сети, напряжения на фазах могут существенно отличаться от номинального фазного значения  $U_{\Phi,Н} = 220$  В, изменяясь в пределах от нуля до линейного напряжения  $U_{Л,Н} = 380$  В. Соответственно, будут меняться протекающие по сопротивлениям фазные токи и выделяемые фазные активные мощности.

Кроме того, в ходе моделирования при протекании токов по сопротивлениям будут изменяться значения сопротивлений. Например, для самой мощной ступени  $R1 = 4,42$  Ома в результате нагрева сопротивление увеличилось до 4,6 Ома, т.е. изменение сопротивления составило около 4 %.

Опытная электрическая сеть в соответствии с требованиями ПУЭ имеет заземляющие устройства в трансформаторной подстанции  $R_{ЗУ,ТП}$ , повторных заземлений

нулевого провода  $R_{\Pi}$  на опорах воздушной линии и у потребителя  $R_{ЗУ.П}$  и (рисунок Г.3). В таблице Г.3 представлены результаты выборочных замеров сопротивлений заземляющих устройств трансформаторной подстанции и воздушной линии напряжением 380.

Таблица Г.3 – Параметры заземляющих устройств (ЗУ) ТП и ВЛ-380 В

ЗУ	R, Ом	Тип опоры	ЗУ	R, Ом	Тип опоры
$R_{ЗУ.ТП}$	1,84	–	$R_{\Pi 12}$	22,3	Б
$R_{\Pi 1}$	29,2	ЖБ + П	$R_{\Pi 14}$	5,6	Б
$R_{\Pi 3}$	27,4	Б	$R_{\Pi 16}$	17,1	Б
$R_{\Pi 7}$	25,3	ЖБ + П	$R_{\Pi 17}$	17,0	Б
$R_{\Pi 10}$	26,8	Б			

Сопротивление заземляющего устройства потребителя  $R_{ЗУ.П}$  выполнено в виде 6-ти вертикальных стержней длиной 2 м в виде трубы диаметром 40 мм, расположенных на расстоянии 3 м (рисунок Г.7). Заземляющее устройство расположено за конечной опорой № 19 между забором и линией и имеет соединение с нейтральной точкой сопротивлений нагрузки – рисунок Г.7. Параметры заземляющего устройства, замеренные службой СДИЗП ПО «Центральные электрические сети», приведены в таблице Г.4. Сопротивления заземляющего устройства замерены через два дня после хороших дождей – грунт влажный.

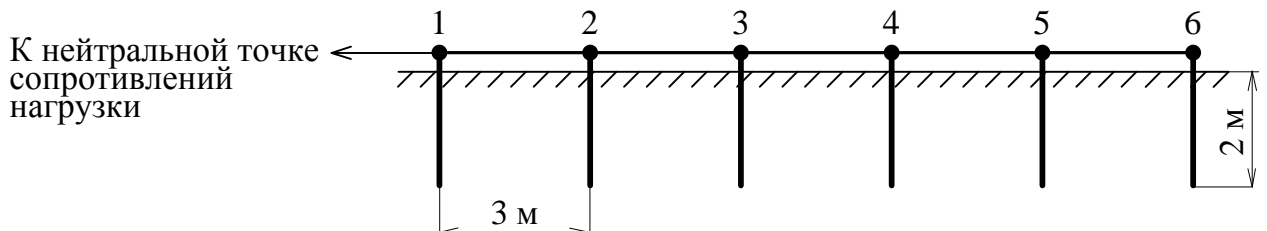


Рисунок Г.7 – Схема исполнения заземляющего устройства потребителя

На рисунке Г.8 показаны фотографии ячейки нагрузочных сопротивлений.



Таблица Г.4 – Сопротивления стержней заземляющего устройства потребителя

№ пп	Номер стержня или группы стержней	Сопротивление, Ом
1	1	22,39
2	2	30,51
3	3	43,4
4	4	30,7
5	5	29,5
6	6	18,0
7	1–5	6,37

Продолжение таблицы Г.4

№ пп	Номер стержня или группы стержней	Сопротивление, Ом
8	2–5	8,11
9	3–5	10,25
10	4–5	15,80
11	$R_{зу.п} + R_{п} + R_{вл} + R_{зу.тп}$ (замеренное с конца линии)	2,08
12	$R_{зу.п} + R_{п} + R_{вл} + R_{зу.тп}$ (замеренное с начала линии)	2,28

Возможные направления исследований на опытной электрической сети. Поскольку опытная электрическая сеть и подключенные к ней потребители электрической энергии не критичны к перенапряжениям, то в ней можно создавать самые различные несимметричные режимы работы воздушной линии в разных точках по её длине, которые достаточно сложно или невозможно организовать в действующих электрических сетях, т.к. они опасны как для подключенных электроприёмников, так и для населения и животных, находящихся вблизи воздушных линий. Перечислим наиболее актуальные и характерные режимы работы электрической сети напряжением 380 В:

1 Короткие замыкания одного, двух или трёх фазных проводов на нулевой провод.

2 Двух- и трёхфазные короткие замыкания.

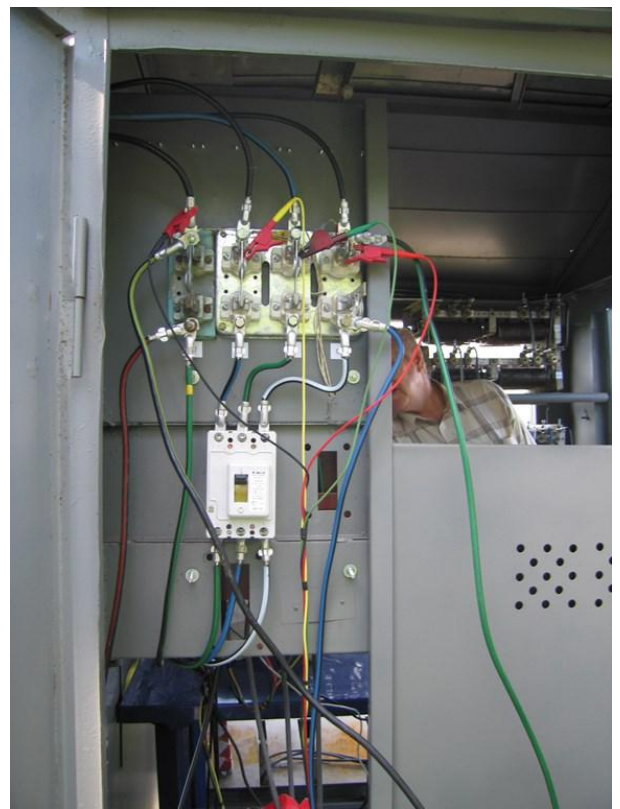
3 Одно-, двух- или трёхфазные обрывы проводов, обрыв нулевого провода.

4 Замыкания фазного или нулевого проводов на землю без их обрыва или с их обрывом.

5 Сложные виды повреждений, например, обрыв нулевого провода с одновременным замыканием фазного провода на оборвавшийся нулевой провод со стороны потребителя.



а)



б)



в)



г)

Рисунок Г.8 – Ячейка нагрузочных сопротивлений: а – общий вид ячейки; б – отсек однофазных рубильников и автоматического выключателя; в – панель счётчика электроэнергии; г – отсек блоков нагрузочных резисторов



д)



е)

Окончание рисунка Г.8 – Ячейка нагрузочных сопротивлений:  
д – блоки нагрузочных резисторов; е – внутренний вид ячейки

6 Нормальные и несимметричные режимы работы электрической сети с изменением в большом диапазоне несимметрии фазных нагрузок потребителей электроэнергии.

7 Изменение сопротивлений заземляющих устройств трансформаторной подстанции и потребителей, а также сопротивлений повторных заземлителей нулевого провода воздушной линии.

Для фиксации напряжений и токов предполагается использование следующей измерительной техники:

- самопишущих цифровых осциллографов, позволяющих фиксировать непрерывные (аналоговые) изменения напряжений и токов, например, типа АОС-5110;

- самопишущих цифровых комплектов, например, типа «Ресурс-2UF2M», которые позволяют производить запись измеряемых параметров с интервалами осреднения 0,02–3–60 с; фиксировать большое количество параметров, в частности, изменения напряжений, токов, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности, симметричных составляющих напряжений и токов, а также наблюдаемые периоды времени;

- токовых клещей с диапазоном измерения токов от 4 мА до 100 А, позволяющих измерять как очень малые токи, протекающие по повторным заземлителям, так и токи, протекающие по фазным и нулевому проводам линии. Кроме того, с помощью клещей можно замерять различные варианты дифференциальных токов, например типа KEW Snap 2432;

- различного вида мультиметров, например, типа MASTECH MY-60.

При этом предполагается, что комплекты измерительных и фиксирующих приборов можно устанавливать как в месте «создания» повреждения, так и в начале воздушной линии – в РУ-0,4 кВ ТП.

В опытной электрической сети можно проводить исследования по следующим направлениям:

1 Исследование изменений токов, протекающих по фазным и нулевому проводам, по заземляющим устройствам трансформаторной подстанции и потребителей, по повторным заземлителям нулевого провода воздушной линии:

- в нормальном режиме работы электрической сети при изменении несимметрии фазных нагрузок потребителей и изменении сопротивлений выше названных заземляющих устройств электрической сети. Исследования позволят определить и сформировать условия отстройки средств защиты;

- при возникновении различного рода коротких замыканий, в том числе, и однофазных замыканий на землю. Исследования позволят проверить степень достоверности критериев распознавания различных видов повреждений воздушной линии, установленных в процессе исследований на компьютерной модели, и определить требования к токовым защитам, в частности, построенным с использованием плавких предохранителей, автоматических выключателей.

2 Исследование различных вариантов дифференциальных токов воздушной линии, например, полученных путем векторного суммирования трёх фазных токов или суммирования трёх фазных токов и тока в нулевом проводе. При этом предполагается оценить влияние на дифференциальные токи сопротивлений повторных

заземлителей и сопротивлений заземляющих устройств электроустановок потребителей. Исследования позволят более чётко сформулировать требования к различного рода защитах воздушной линии при однофазных коротких замыканиях и однофазных замыканиях на землю.

3 Исследование изменений фазных напряжений, напряжения несимметрии, симметричных составляющих напряжений сети при обрывах фазных и нулевого проводов. Исследования позволят проверить критерии распознавания рассматриваемых режимов работы электрической сети, выявленных при исследованиях на компьютерной модели, и сформулировать требования к защитах, работа которых основана использовании информации об её напряжениях.

4 Испытание и исследование работы серийных и опытных образцов различного рода устройств защиты электрической сети.

5 Исследование условий электробезопасности электрической сети при моделировании различных режимов её работы.

### ***Описание программы испытаний***

Проведение исследований в действующих электрических сетях является ответственным мероприятием и требует тщательной подготовки и решения организационно-технических вопросов. Одним из важных организационных мероприятий является разработка программы проведения экспериментов, содержание которой включает в себя следующие разделы:

1 Описание схемы эксперимента.

2 Объём экспериментальных исследований.

3 Расстановка измерительных приборов в схеме и организация измерений во время проведения экспериментов.

4 Разработка регламента проведения экспериментов, определяющего последовательность действий участников эксперимента.

5 Обеспечение безопасности лиц, принимающих участие в проведении экспериментов, согласно требованиям нормативных документов [39].

6 Обработка и анализ экспериментальных данных.

Рассмотрим последовательно содержание разделов программы проведения эксперимента.

***В разделе «Описание схемы эксперимента»*** приводятся основные принципиальные схемы, которые должны давать чёткие представления об опытной электрической сети, в которой проводятся экспериментальные исследования:

Дальнейшие ссылки на обозначение коммутационных аппаратов, резисторов, номера опор и т.п. соответствуют обозначениям и номерам указанного описания опытной электрической сети.

***Раздел «Объём экспериментальных исследований»*** содержит перечень режимов работы электрической сети:

1 Нормальный режим работы электрической сети при изменении фазных нагрузок.

2 Поочерёдные обрывы одного из фазных проводов при изменении фазных нагрузок.

3 Обрыв нулевого провода при изменении фазных нагрузок.

Дополнительно могут быть проведены экспериментальные исследования при следующих аварийных режимах работы электрической сети:

4 Одновременные обрывы двух фазных проводов.

5 Одновременный обрыв нулевого и одного из фазных проводов.

6 Удалённое однофазное короткое замыкание на воздушной линии, которое токовые защиты либо совсем не отключают, либо отключают с большими выдержками времени.

**В разделе «Расстановка измерительных приборов в схеме и организация измерения»** указываются места установки измерительных приборов, схемы их подключения и требования по электробезопасности при проведении замеров в действующих электрических сетях.

Измерения должны проводиться с учетом методических рекомендаций, отраженных в нормативных документах, регламентирующих организацию, объем и нормы испытания электрооборудования и аппаратов, принятых при эксплуатации электрических сетей Российской Федерации [40, 43].

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

На подготовительном этапе определяются фактические параметры элементов опытной электрической сети:

- сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора и воздушной линии с неизолированными проводами;
- сопротивления заземляющих устройств трансформаторной подстанции, вторичных заземлений нулевого провода воздушной линии и потребителя.

Для получения наиболее полной информации о параметрах электрической сети при различных режимах её работы при экспериментальных исследованиях используем три цифровых самопишущих измерительных комплекта типа «Ресурс-2UF2М», которые будут размещены в следующих точках электрической сети (рисунок Г.1):

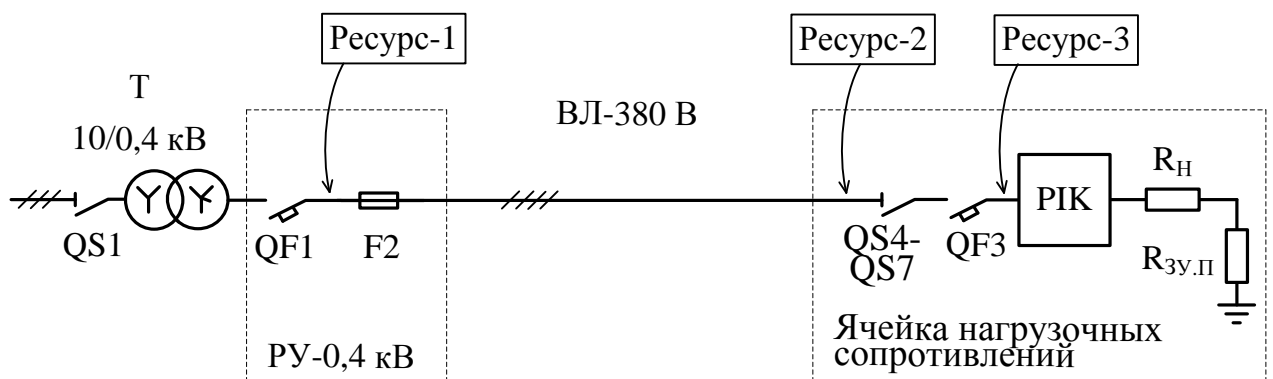


Рисунок Г.1 – Схема расстановки измерительных комплектов «Ресурс-2UF2М»

– Ресурс-2 и Ресурс-3 в конце воздушной линии в ячейке нагрузочных сопротивлений; первый комплект устанавливается на вводе в ячейку перед рубильниками QF4–QF7, а второй комплект перед микропроцессорным счётчиком электрической энергии РИК – после автоматического выключателя QF3.

– Ресурс-1 в распределительном устройстве РУ-0,4 кВ трансформаторной подстанции после вводного автоматического выключателя QF1 и перед плавкими предохранителями F2 – это позволит фиксировать параметры на выводах силового трансформатора (в начале электрической сети напряжением 380 В) при всех экспериментальных исследованиях; при создании разрывов проводов в начале линии Ресурс-2 может быть перемещён также в начало воздушной линии но должен быть подключен после их обрыва;

– в случае создания обрывов проводов в середине воздушной линии комплекты Ресурс-1 и Ресурс-3 остаются на месте, а Ресурс-2 подключается к сети сразу за местом разрыва проводов.

С целью обеспечения условий электробезопасности дополнительно к программе должен быть разработан **регламент проведения экспериментов** в котором указывают: последовательность действий при подготовке электрической сети для моделирования различных режимов её работы; последовательность действий при подаче напряжения и выполнения каждого этапа эксперимента, в том числе, и проведения замеров; конкретные организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ; ответственные лица за выполнение отдельных пунктов эксперимента [39, 40].

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

### **Регламент проведения экспериментов.**

#### ***Нормальный режим работы электрической сети.***

1 При экспериментальных исследованиях этого режима работы будем менять следующие параметры электрической сети:

1.1 При максимальной нагрузке на двух фазах В и С (при минимальных значениях сопротивлений  $R_{Н,В} = R_{Н,С} = 4,4 \text{ Ом}$ , что соответствует 100 %-й максимальной нагрузке) будем изменять нагрузку на фазе А от 100 до 0 % (изменение сопротивления  $R_{Н,А}$  сначала от 4,4 Ом до 96 Ом, а затем отключение этого сопротивления полностью, т.е. при  $R_{Н,А} = \infty \text{ Ом}$ ).

1.2 При максимальной нагрузке на фазе С будем одновременно будем изменять нагрузку на фазах А и В от 100 % до 0 %.

1.3 Указанные изменения нагрузки проведём сначала при наличии сопротивления заземляющего устройства потребителя, равном  $R_{ЗУ,П} = 6,37 \text{ Ом}$ , а затем при отключенном заземляющем устройстве, т.е. при  $R_{ЗУ,П} = \infty \text{ Ом}$ .

2 В отключенной электрической сети производим расстановку и подключение измерительных приборов согласно схеме, показанной на рисунке Г.1. Проводим синхронизацию времени работы всех трёх измерительных комплектов «Ресурс-1», «Ресурс-2», «Ресурс-3» и осуществляем их пуск (комплекты «Ресурс» будут работать непрерывно, записывая информацию о параметрах электрической сети при

различных режимах её работы, в течение проведения всех экспериментов, например, в течение дня).

3 Начинаем исследовать изменение параметров электрической сети при изменении нагрузки фазы А и подключенном заземляющем устройстве потребителя.

3.1 Подключаем к нейтральной точке нагрузочных сопротивлений заземляющее устройство с минимальным сопротивлением  $R_{ЗУ.П} = 6,37 \text{ Ом}$ .

3.2 Устанавливаем одинаковые сопротивления нагрузки  $R_{Н.А} = R_{Н.В} = R_{Н.С} = 4,4 \text{ Ом}$ , соответствующие 100 %-й нагрузке воздушной линии.

3.3 Автоматическим выключателем QF1 подаём напряжение на воздушную линию.

3.4 Автоматическим выключателем QF3 подаём напряжение на нагрузочные сопротивления. В течение 5-ти минут фиксируем с помощью комплектов «Ресурс» напряжения и токи.

3.5 Отключаем выключатель QF3 в ячейке нагрузочных сопротивлений. Проверяем отсутствие напряжения на нагрузочных сопротивлениях и производим переключение сопротивления нагрузки  $R_{НА}$  на большее значение. Переходим к выполнению пункта 3.4.

Выполнение пунктов 3.4 и 3.5 производим до тех пор, пока не переберём все возможные значения сопротивления  $R_{НА}$ , в том числе, когда оно будет отключено от сети полностью.

3.6 Отключаем последовательно автоматические выключатели QF3 и QF1, снимая напряжения с нагрузочных сопротивлений и воздушной линии.

4 Переходим к исследованию при изменении нагрузки в двух фазах А и В и подключенном заземляющем устройстве потребителя.

4.1 Сопротивление  $R_{ЗУ.П} = 6,37 \text{ Ом}$  остаётся включенным. Снова устанавливаем одинаковые сопротивления  $R_{Н.А} = R_{Н.В} = R_{Н.С} = 4,4 \text{ Ом}$ .

4.2 Автоматическим выключателем QF1 подаём напряжение на воздушную линию.

4.3 Автоматическим выключателем QF3 подаём напряжение на нагрузочные сопротивления. В течение 5-ти минут фиксируем с помощью комплектов «Ресурс» напряжения и токи.

4.4 Отключаем выключатель QF3 в ячейке нагрузочных сопротивлений. Проверяем отсутствие напряжения на нагрузочных сопротивлениях и производим переключение сопротивлений нагрузки  $R_{НА}$  и  $R_{НВ}$  на большие значения. Переходим к выполнению пункта 4.3.

Выполнение пунктов 4.3 и 4.4 производим до тех пор, пока не переберём все возможные значения сопротивлений  $R_{НА}$  и  $R_{НВ}$ , в том числе, когда они будут отключены от сети полностью.

4.5 Отключаем последовательно автоматические выключатели QF3 и QF1, снимая напряжения с нагрузочных сопротивлений и воздушной линии.

5 Согласно второй части п. 1.3 производим отключение сопротивления заземляющего устройства  $R_{ЗУ.П}$  от нейтрали нагрузочных сопротивлений и повторяем выполнение пунктов 3.2–3.6 и 4.2–4.5.

На этом исследование параметров электрической сети при нормальном её режиме работы заканчивается.



### **Обрыв фазного провода.**

6 При экспериментальных исследованиях этого режима работы будем менять следующие параметры электрической сети:

6.1 Искусственный разрыв будем производить для фазы В последовательно в конце линии, отключая рубильник QF5 (рисунок Г.5) в ячейке нагрузочных сопротивлений, и в начале линии, извлекая предохранитель F2 в фазе В.

6.2 При максимальной нагрузке на фазе С (при минимальном значении сопротивления  $R_{Н,С} = 4,4 \text{ Ом}$ ) будем изменять нагрузку на фазе А от 100 до 0 % (изменение сопротивления  $R_{Н,А}$  сначала от 4,4 Ом до 96 Ом, а затем отключение этого сопротивления полностью, т.е. при  $R_{Н,А} = \infty \text{ Ом}$ ).

6.3 Указанные изменения нагрузки проведём сначала при наличии сопротивления заземляющего устройства потребителя, равном  $R_{ЗУ,П} = 6,37 \text{ Ом}$ , а затем при отключенном заземляющем устройстве, т.е. при  $R_{ЗУ,П} = \infty \text{ Ом}$ .

7 Начинаем исследовать изменение параметров электрической сети при искусственном разрыве фазы В в конце линии, включенном сопротивлении  $R_{ЗУ,П} = 6,37 \text{ Ом}$  и при изменении нагрузки на фазе А.

7.1 Отключаем рубильник QF5 в ячейке нагрузочных сопротивлений, создавая разрыв в фазе В. Подключаем к нейтральной точке нагрузочных сопротивлений заземляющее устройство  $R_{ЗУ,П} = 6,37 \text{ Ом}$ .

7.2 Устанавливаем одинаковые сопротивления нагрузки  $R_{Н,А} = R_{Н,В} = R_{Н,С} = 4,4 \text{ Ом}$ , соответствующие 100 %-й нагрузке воздушной линии.

7.3 Автоматическим выключателем QF1 подаём напряжение на воздушную линию.

7.4 Автоматическим выключателем QF3 подаём напряжение на нагрузочные сопротивления. В течение 5-ти минут фиксируем с помощью комплектов «Ресурс» напряжения и токи.

7.5 Отключаем автоматический выключатель QF3 в ячейке нагрузочных сопротивлений. Проверяем отсутствие напряжения на нагрузочных сопротивлениях и производим переключение сопротивления нагрузки  $R_{Н,А}$  на большее значение. Переходим к выполнению пункта 7.4.

Выполнение пунктов 7.4 и 7.5 производим до тех пор, пока не переберём все возможные значения сопротивления  $R_{Н,А}$ , в том числе, когда оно будет отключено от сети полностью.

7.6 Отключаем последовательно автоматические выключатели QF3 и QF1, снимая напряжения с нагрузочных сопротивлений и воздушной линии.

8 Переходим к исследованию изменения параметров электрической сети при искусственном разрыве фазы В в конце линии, отключенном сопротивлении  $R_{ЗУ,П}$  и при изменении нагрузки на фазе С.

8.1 Производим отключение сопротивления заземляющего устройства  $R_{ЗУ,П}$  от нейтрали нагрузочных сопротивлений.

8.2 Повторяем выполнение пунктов 7.2–7.6.

8.3 Восстанавливаем нормальную схему электрической сети, включая рубильник QF5 в ячейке нагрузочных сопротивлений.

9 Переходим к исследованию изменения параметров электрической сети при искусственном разрыве фазы В в начале линии, включенном сопротивлении  $R_{з.п}$  и при изменении нагрузки на фазе А.

9.1 В распределительном устройства напряжением 0,4 кВ трансформаторной подстанции извлекаем плавкий предохранитель F2 фазы В. Подключаем к нейтральной точке нагрузочных сопротивлений заземляющее устройство  $R_{з.п} = 6,37 \text{ Ом}$ .

9.2 Выполняем последовательно пункты 7.2–7.6.

10 Переходим к исследованию изменения параметров электрической сети при искусственном разрыве фазы В в начале линии, отключенном сопротивлении  $R_{з.п}$  и при изменении нагрузки на фазе А.

10.1 Производим отключение сопротивления заземляющего устройства  $R_{з.п}$  от нейтрали нагрузочных сопротивлений.

10.2 Повторяем выполнение пунктов 7.2–7.6.

10.3 Восстанавливаем нормальную схему электрической сети, устанавливая плавкий предохранитель F2 в фазе В.

На этом исследование параметров электрической сети при обрыве фазного провода заканчивается.

#### ***Обрыв нулевого провода.***

11 При экспериментальных исследованиях этого режима работы будем менять следующие параметры электрической сети:

11.1 При максимальной нагрузке на двух фазах В и С (при минимальных значениях сопротивлений  $R_{н.в} = R_{н.с} = 4,4 \text{ Ом}$ ) будем изменять нагрузку на фазе А от 100 до 0 %.

11.2 При максимальной нагрузке на фазе С будем одновременно будем изменять нагрузку на фазах А и В от 100 % до 0 %.

11.3 Указанные изменения нагрузки проведём при трёх значениях сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{з.п}$ , – 6,37 Ом; 30,5 Ом;  $\infty$  Ом (при отключенном заземляющем устройстве).

12 В ячейке нагрузочных сопротивлений отключаем рубильник QS7 (рисунок Г.5), создавая искусственный разрыв нулевого провода перед потребителем.

13 Выполняем последовательно пункты 3.1–3.6 и 4.1–4.5.

14 При отключенных автоматических выключателях QF1 и QF3 проверяем отсутствие напряжения в ячейке нагрузочных сопротивлений. Отсоединяем 1 и 3–6 вертикальные стержни заземляющего устройства потребителя, оставляя подключенным к сети только 2-й стержень, имеющий сопротивление 30,5 Ом.

15 Выполняем последовательно пункты 3.2–3.6 и 4.2–4.5.

16 При отключенных автоматических выключателях QF1 и QF3 проверяем отсутствие напряжения в ячейке нагрузочных сопротивлений и полностью отсоединяем заземляющее устройство потребителя от нейтрали нагрузочных сопротивлений.

17 Выполняем последовательно пункты 3.2–3.6 и 4.2–4.5.

На этом исследование параметров электрической сети при обрыве нулевого провода заканчивается.

***Испытание системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов.***

18 Испытание системы защиты проводится в следующих режимах работы электрической сети:

18.1 В нормальном режиме работы – при симметричной фазной нагрузке потребителя; при предельных изменениях несимметрии нагрузок по фазам (отсутствует нагрузка на одной или двух фазах); при подключенном или отключенном заземляющем устройстве потребителя.

18.2 При обрыве фазного провода – в конце, начале или середине линии; при симметричной фазной нагрузке потребителя; при предельных изменениях несимметрии нагрузок по фазам (отсутствует нагрузка на одной или двух фазах); при подключенном или отключенном заземляющем устройстве потребителя.

18.3 При обрыве нулевого провода на вводе потребителя – при симметричной фазной нагрузке потребителя; при предельных изменениях несимметрии нагрузок по фазам (отсутствует нагрузка на одной или двух фазах); при подключенном или отключенном заземляющем устройстве потребителя.

18.4 Дополнительно могут быть проведены испытания при одновременном обрыве двух фазных проводов; одновременном обрыве нулевого и одного фазного проводов; удалённом однофазном коротком замыкании на воздушной линии, которое токовые защиты либо совсем не отключают, либо отключают с большими выдержками времени.

Для проведения испытаний микропроцессорный счётчик включается на вводе ячейки нагрузочных сопротивлений (имитирующих нагрузку потребителя). Все указанные режимы проводятся по регламенту, описанному в пунктах 1–19.

19 Во время проведения испытаний системы защиты будут фиксироваться следующие параметры:

19.1 Фазные напряжения и токи, углы между фазными напряжениями, напряжение нулевой последовательности – эти параметры считываются с дисплея микропроцессорного счётчика.

19.2 Время дозвона до диспетчера и время дозвона до GSM-ключа (время отключения воздушной линии при возникновении обрывов фазных и нулевого проводов). Время будет фиксироваться с помощью секундомеров, находящихся в ячейке нагрузочных сопротивлений и трансформаторной подстанции.

20 Искусственные разрывы проводов будут осуществляться отключением автоматического выключателя QF10, шунтирующего место разрыва.

21 Испытания системы защиты при каждом режиме работы электрической сети будут проводиться в следующей последовательности:

21.1 Собирается соответствующая схема. Место разрыва провода шунтируется включенным автоматическим выключателем QF10.

21.2 Включаются автоматические выключатели QF1 и QF3.

21.3 Через три минуты, необходимые для фиксации измерительными комплектами «Ресурс» текущих параметров, отключаем автоматический выключатель QF10, фиксируем реакцию микропроцессорного счётчика на исследуемый режим работы сети, время дозвона до диспетчера и время отключения автоматического выключателя QF3.

21.4 После срабатывания системы защиты отключаем автоматические выключатели QF1 и QF3. Если срабатывание не происходит (в течение 30–60 сек.), то отключение выключателей QF1 и QF3 производим вручную.

21.5 Для фиксации данных, считываемых с дисплея счётчика, отключаем питание GSM-ключа (разрываем канал отключающего импульса) и при исследуемом режиме работы сети считываем с дисплея счётчика названные выше параметры.

На этом испытание системы защиты при обрывах фазного или нулевого проводов заканчивается.

Результаты измерений в опытной электрической сети представлены в таблицах 2.13 – 2.17.