

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

*На правах рукописи*

**Млоток Алексей Владимирович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРЫВАХ  
ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В**

Специальность 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика)

**Диссертация**

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

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

Челябинск – 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	6
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ . . . . .	10
1.1 Обрывы фазных и нулевого проводов воздушных линий электриче- ских сетей напряжением 380 В . . . . .	10
1.2 Основные опасности, возникающие при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий электрических сетей напряжением 380 В . . . .	14
1.3 Существующие методы и средства защиты электрических сетей на- пряжением 380 В от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной ли- нии . . . . .	17
1.3.1 Общие положения . . . . .	17
1.3.2 Защиты, построенные на использовании напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательности . . . . .	18
1.3.3 Защиты, построенные на использовании наложенных токов . . . .	22
1.3.4 Защита, построенная на использовании частотно-импульсных сигналов . . . . .	29
1.3.5 Защиты, построенные на сравнении токов . . . . .	31
1.3.6 Защита, построенная на использовании дифференциальных то- ков . . . . .	33
1.4 Задачи исследования . . . . .	35
2 ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ВОЗНИКНИКАЮЩИХ ПРИ ОБРЫВАХ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В . . . . .	37
2.1 Режимы работы электрической сети напряжением 380 В с воздуш- ными линиями . . . . .	38
2.2 Применение компьютерной модели для исследования режимов ра- боты электрической сети напряжением 380 В . . . . .	50

2.3 Исследования на компьютерной модели изменений напряжений в электрической сети при различных режимах работы воздушных линий и параметрах нагрузки потребителей . . . . .	53
2.3.1 Исследования влияния несимметрии нагрузок потребителей на напряжения электрической сети при нормальном режиме её работы .	53
2.3.2 Исследования напряжений электрической сети при обрывах фазного провода . . . . .	60
2.3.3 Исследования напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода . . . . .	68
2.3.4 Исследования влияния сопротивления заземляющего устройства потребителя на напряжения электрической сети . . . . .	75
2.3.5 Логические признаки, характеризующие режимы работы электрической сети напряжением 380В при обрывах фазных и нулевого проводов воздушной линии . . . . .	88
2.4 Анализ логических признаков, характеризующих различные режимы работы воздушной линии напряжением 380 В . . . . .	92
2.5 Выводы . . . . .	106
<b>3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В . .</b>	<b>108</b>
3.1 Анализ характеристик микропроцессорных счётчиков электрической энергии для оценки возможности выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В . . . . .	108
3.2 Обзор методов передачи информации от микропроцессорных счётчиков электроэнергии до центров сбора и учёта данных . . . . .	113
3.3 Разработка функциональной схемы системы защиты и дополнительных функций для микропроцессорного счётчика электроэнергии с целью выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В . . . . .	122
3.4 Выводы . . . . .	133

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В . . . .	134
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований в опытной электрической сети . . . . .	134
4.2 Экспериментальные исследования режимов работы электрической сети и испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов на физической модели напряжением 220 В . . . . .	145
4.3 Экспериментальные исследования режимов работы воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В . . . . .	149
4.4 Экспериментальные исследования системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов в опытной электрической сети . . . . .	154
4.5 Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В при внедрении системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов . . . . .	162
4.6 Выводы . . . . .	165
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ . . . . .	166
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК . . . . .	168
ПРИЛОЖЕНИЯ . . . . .	180
ПРИЛОЖЕНИЕ А Физическая модель электрической сети напряжением 220 В . . . . .	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Опытная электрическая сеть напряжением 380 В . . . .	192
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты исследований на компьютерной модели изменений напряжений при различных режимах работы электрической сети напряжением 380 В . . . . .	210
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями . . . . .	219

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Протокол испытаний на физической модели системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов . . . . .	246
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Результаты исследований режимов работы электрической сети в опытной электрической сети . . . . .	251
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Копии актов испытаний . . . . .	262

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Наиболее частым повреждением в электрических сетях напряжением 380 В с глухозаземлённой 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 показывает, что ежегодно на 100 км линий напряжением 380 В приходится 40–50 повреждений, причем около 40% составляют обрывы фазных проводов.

По данным ОАО «МРСК Урала» каждый год при возникновении указанных электроопасных ситуаций погибает 4–5 человек, в том числе, дети.

Практика эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В показывает отсутствие технических решений, обеспечивающих определение возникновения обрывов фазных и нулевого проводов и отключение опасных участков.

Поэтому обоснование, разработка и внедрение системы защиты, которая позволяет своевременно выявлять обрывы фазных и нулевого проводов и отключать линии, где они произошли, является актуальной научно-технической задачей.

Работа выполнена в соответствии с приказом ОАО «МРСК Урала» от 31.08.2012 г. № 233 «О реализации программы по предотвращению электротравматизма сторонних лиц».

**Цель работы** – создание системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В (ВЛ-380 В).

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

1. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования напряжений, возникающих в электрической сети при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В.

2. На основании указанных исследований обосновать критерии выявления обрывов фазных и нулевого проводов указанных линий.

3. Разработать систему защиты при обрывах фазных и нулевого проводов, основанную на измерении режимных параметров воздушных линий напряжением 380 В.

4. Провести комплексные испытания разработанной системы защиты и оценить повышение уровня электробезопасности в результате её внедрения в практику эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В.

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

**Предмет исследования** – выявление закономерностей в изменении напряжений в электрической сети при возникновении обрывов фазных и нулевого проводов, позволяющих разработать защиту от указанных режимов.

**Методологическая и теоретическая основа исследования:** в основу данной работы легли труды И.А. Будзко, Т.Б. Лещинской, Т.В. Ерёминой, О.К. Никольского, И.Ф. Суворова, А.И. Сидорова и других учёных, внесших значительный вклад в науку о развитии электробезопасности при эксплуатации электрических сетей напряжением до 1000 В.

Обоснование и достоверность полученных результатов подтверждаются корректным применением компьютерной модели для анализа возможных режимов на линиях напряжением 380 В, хорошим совпадением этих результатов с данными, полученными на физической модели и в опытной электрической сети, практикой эксплуатации мелкой серии разработанной системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов в электрических сетях Красноармейского РЭС ПО «Центральные электрические сети» филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго».

**Научная новизна основных положений и результатов, выносимых на защиту:**

1. Установлены закономерности в изменении напряжений, возникающих при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий в электрических сетях напряжением 380 В с изменяющейся несимметричной фазной нагрузкой, позволившие определить логические признаки, обеспечивающие выявление этих обрывов.

2. Разработаны критерии выявления различных режимов работы воздушной линии напряжением 380 В, что обеспечило возможность предложить дополнительные функции для микропроцессорного счетчика электрической энергии с целью использования его для определения появления обрывов на указанной линии.

3. Система защиты при обрывах фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В, отличающаяся от известных тем, что для определения указанных обрывов производится измерение только напряжений в электрической сети в конце воздушной линии, а команда отключения по каналам связи передаётся на коммутационные аппараты, установленные в начале линии.

4. Результаты испытаний разработанной защиты на физической модели и в опытной электрической сети.

#### **Практическая значимость работы и реализация её результатов:**

1. Создана система защиты при обрывах фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В, установленная в опытную эксплуатацию на 10 линиях Красноармейского РЭС ПО «Центральные электрические сети» филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго».

2. Применение разработанной системы защиты при эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В повышает уровень электробезопасности не менее чем в 20 раз.

3. Результаты исследований используются в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета при подготовке специалистов по направлению «Техносферная безопасность».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Научные положения, приведённые в диссертации, соответствуют области исследований специальности 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика), в частности, п. 3 «Разработка методов контроля, оценки и нормирования опасных и вредных факторов производства, способов и средств защиты от них».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены и получили одобрение на: V Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии»

(г. Челябинск, 2012 г.); LI и LIII Международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному комплексу» (г. Челябинск, 2013, 2014 гг.); Международной заочной научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (г. Чита, 2013 г.); VII Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования» (г. Душанбе, 2014 г.); 65-й научной конференции «Наука ЮУрГУ» (г. Челябинск, 2013 г.); семинарах аспирантов и докторантов кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ЮУрГУ (2012–2014 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 3 работы – в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы (116 наименований), семи приложений. Содержит 179 страницы основного текста, в том числе 57 рисунков, 18 таблиц.

# 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## **1.1 Обрывы фазных и нулевого проводов воздушных линий электрических сетей напряжением 380 В**

Анализ статистических данных аварийных отключений электрических сетей напряжением 380 В показывает, что наиболее распространёнными повреждениями в них являются обрывы фазных и нулевого проводов, короткие замыкания и замыкания на землю. Удельный вес отдельных повреждений в тех или иных районах страны зависит от климатических и природных условий, состояния и конструкции сетей, особенностей эксплуатации [1, 7, 19, 25, 32, 40, 49, 50, 51].

Аварийные режимы, возникающие в электрических сетях напряжением до 1000 В, обусловленные обрывом проводов, занимают значительную часть в общем количестве повреждений [63]. Они вызывают появление неполнофазных режимов, которые приводят к выходу из строя электродвигателей, что связано с остановкой всего технологического процесса и массовому недоотпуску продукции [75].

В настоящее время около 40 % электродвигателей, получающих электроэнергию по воздушным линиям 380 В (ВЛ-380 В), выходят из строя из-за обрыва фазы питающей сети [64]. Кроме того, обрывы проводов являются одним из источников электротравматизма. Например, до 40 % электропоражений в сельскохозяйственном производстве приходится на воздушные линии электропередачи [110, 111].

Воздушные электрические сети напряжением 380 В – самый ненадёжный элемент электроснабжения потребителей. Гололёд, сильный ветер, при котором в результате схлёстывания проводов возможно их перегорание или перетирание в местах крепления к изолятору, обрыв проводов механизмами или наезд на опору транспортных средств – причины, создающие повышенную вероятность обрыва проводов и поражения людей и животных электрическим током [66, 67].

Анализ аварийной статистики показал, что ежегодно на 100 км линий 380 В приходится 40–50 повреждений, причём около 62 % из них опасны для людей и животных [79]. Примерно 40 % всех повреждений воздушных линий составляет обрыв фазного провода.

Данные анализа работы МУП «Рязанские городские распределительные сети» в период 1995–2005 гг., проведённого Рязанской государственной сельскохозяйственной академией [13, 14], подтверждают, что воздушные линии напряжением 380 В, выполненные неизолированными проводами, являются самыми ненадёжными элементами электрической сети, на долю которых приходится 40–43 % всех повреждений [12]. Результаты анализа 7784 повреждений ВЛ-380 В показывают, что причинами являются: окисление проводов – 18 %; обрывы вводов – 6 %; повреждения опор – 3 %; обрывы проводов – 62 %; схлестывание проводов – 11 %.

Оборвавшиеся и упавшие на землю провода ВЛ напряжением до 1000 В представляют большую опасность поражения электрическим током людей и животных. Но особую опасность они представляют для детей, которые, не ведая об опасности, подходят к лежащим на земле проводам и даже пытаются взять провод в руку, при этом ребенок, как правило, мгновенно погибает либо от так называемого шагового напряжения, либо от напряжения прикосновения [21, 22, 24, 35, 36, 73].

Сведения об электротравматизме в различных отраслях экономики, указывают на повышенную опасность обрывов и провисания фазных и нулевых проводов. Электротравмы происходят из-за непосредственного прикосновения к проводу, который оборвался или провис. Имеются многочисленные факты, когда оборванный провод остаётся на земле под напряжением в течение нескольких дней из-за несовершенства технических средств контроля исправности проводов воздушных линий.

В электрических сетях напряжением 380 В обрывы проводов не всегда приводят к возникновению короткого замыкания и немедленному отключению линии, т.к. в большинстве случаев величина тока замыкания на землю является недоста-

точной для срабатывания защиты из-за большого сопротивления заземления упавшего провода [17, 41, 42].

Предотвратить опасность поражения током при обрывах проводов на линиях 380 В можно лишь путём быстрого автоматического отключения повреждённой линии защитой. Трудность создания токовой защиты вызвана тем, что к воздушным линиям 380 В, в основном, присоединены однофазные потребители и нагрузка каждого провода зависит от того, какое количество токоприёмников (потребителей) присоединено в каждый данный момент к соответствующей фазе сети. Поэтому практически всегда силы токов в фазных проводах сети не одинаковы [66].

Указанные свойства электрических сетей напряжением 380 В ограничивают область применения защитных устройств, использующих в качестве контролируемого параметра силу рабочего тока промышленной частоты. Защита от замыкания на землю в большинстве случаев не может обнаружить обрыв фазного провода из-за большого переходного сопротивления в месте падения провода на землю. Возможны случаи, когда оборванный провод не имеет контакта с землей, например, свисает с опоры линии или ветвей деревьев, с деревянного забора [66].

Поскольку при обрыве провода исчезает напряжение одной из фаз в конце линии, это напряжение можно рассматривать как контролируемый параметр. В защитах электрических сетей напряжением 380 В от обрыва провода [63] контролируют напряжение обратной последовательности.

В Челябинской области протяженность воздушных линий электропередачи напряжением 380 В, располагающихся вдоль улиц и дорог, по населенным пунктам и территориям школ, детских садов, игровых площадок, составляет около 13 тыс. км, из них не более 3 % выполнены самонесущими изолированными проводами, а остальные – неизолированными проводами. Количество ВЛ-380 В по Челябинской области составляет порядка 20230 шт. Каждая ВЛ-380 В является потенциальным источником повышенной опасности, к тому же средний уровень их износа по Челябинской области составляет 80–90 % [43, 46].

На территории, обслуживаемой сетевой компанией ОАО «МРСК Урала» (Свердловская и Челябинская области, Пермский край), в период с 2004 по 2012 гг. количество пострадавших посторонних лиц составило 57 человек. При этом число погибших составило 39 человек, в том числе 7 детей в возрасте до 14 лет [43, 46].

На рисунках 1.1 и 1.2 приведены распределения несчастных случаев с посторонними лицами по годам.



Рисунок 1.1 – Общее распределение несчастных случаев с посторонними лицами



Рисунок 1.2 – Распределение несчастных случаев с детьми по годам

## 1.2 Основные опасности, возникающие при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий электрических сетей напряжением 380 В

Учитывая, что на долю обрывов фазных и нулевого проводов приходится наибольшее число повреждений в электрических сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями электропередачи, необходимо оценить возникающие при этом опасности.

Для оценки условий электробезопасности при обрыве нулевого провода. Здесь следует проанализировать два варианта: в сети нагрузка распределена по фазам равномерно и нагрузка в сети несимметрична. На рисунке 1.3 приведена схема электрической сети, где произошёл обрыв нулевого провода. В каждом из указанных выше вариантов следует проанализировать два подварианта: обрыв нулевого провода и отсутствие события 3 (замыкание одной из фаз на корпус электроприёмника, подключенного к нулевому проводу) и обрыв нулевого провода с одновременным или несколько позднее возникновение события 3.

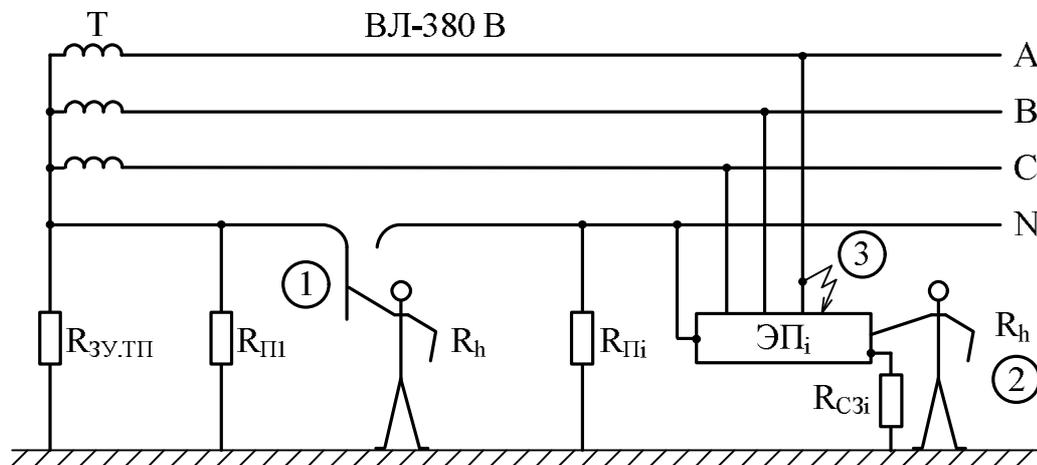


Рисунок 1.3 – Схема электрической сети при обрыве нулевого провода и возникновении событий: 1 – прикосновение человека к оборванному нулевому проводу; 2 – прикосновение человека к корпусу электроприёмника, подключенному к нулевому проводу; 3 – замыкание одной из фаз на корпус этого электроприёмника;  $R_{з\text{у.тп}}$  – сопротивление заземления нейтрали трансформатора Т;  $R_{п\text{т}}-R_{п\text{т}}$  – сопротивление повторных заземлений нулевого провода ВЛ-380 В;  $R_{сз\text{i}}$  – сопротивление самозаземления электроприёмника

При обрыве нулевого провода, отсутствии замыкания одной из фаз сети на корпус электроприёмника за местом обрыва и наличии в сети симметричной нагрузки возникновение событий 1 или 2 не создаёт какую-либо угрозу для жизни человека. Необходимо отметить, что описанная ситуация в электрических сетях до 1000 В, обеспечивающих электроэнергией любые потребители, практически невозможна. Поэтому перейдём к анализу второй ситуации, при рассмотрении которой следует учесть, что в указанных сетях при наличии однофазной нагрузки ток в нулевом проводе может достигать половины фазного значения [34, 60].

В этом случае схема замещения электрической сети, приведённой на рисунке 1.3, примет следующий вид (рисунок 1.4). Для упрощения выводов аналитических зависимостей, подробно рассмотренных в [68], примем, что в сетях с несимметричной нагрузкой имеется только один трёхфазный потребитель, корпуса которого касается человек.

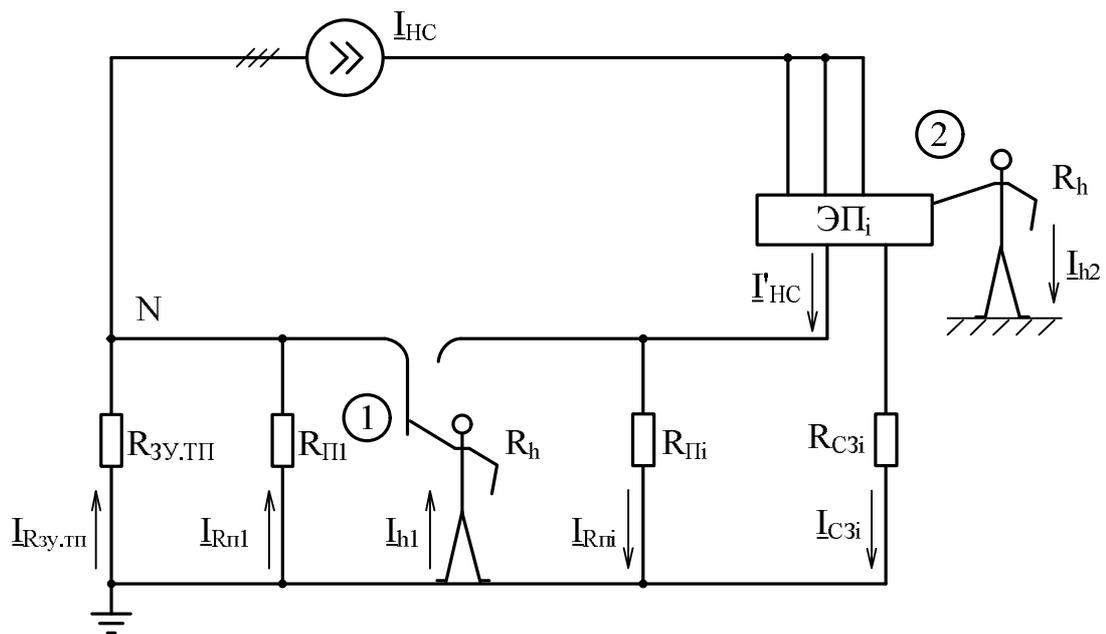


Рисунок 1.4 – Схема замещения электрической сети с указанием токораспределения

При возникновении события 1 ток через тело человека  $I_h$  определяется параметрами  $R_{ЗУ.ТП}$ ,  $R_{П1}$  и  $R_h$ , а также величиной тока несимметрии. Принимая по-

следний равным 25 А,  $R_{3У.ТП} = 4$  Ом,  $R_{Пл} = 30$  Ом и  $R_h = 1000$  Ом, получим, что  $I_{h1} \approx 90$  мА. Этот ток представляет угрозу для жизни человека.

При одновременном возникновении событий 2 и 3 (рисунок 1.3) ток через тело человека определится по формуле:

$$I_h = U_\Phi \cdot \frac{R_{3У.ТП} + R_{Пл}}{R_h \cdot (R_{3У.ТП} + R_{Пл}) + R_{3У.ТП} \cdot R_{Пл} \cdot \left[ \frac{R_h}{R_{C3i}} + \frac{R_h \cdot (i - 1)}{R_{Пл}} + 1 \right]} \quad (1.1)$$

Из выражения (1.1) видно, что ток через тело человека при возникновении событий 2 и 3 (отметим, что в нулевом проводе обрыв) определится количеством повторных заземлений за местом обрыва нулевого провода и величиной сопротивления самозаземления  $R_{C3i}$   $i$ -го электроприёмника. В предельном случае ( $R_{C3i} = 0$ ) ток  $I_h$  также будет равен нулю. При  $R_{C3i} = \infty$ ,  $R_{3У.ТП} = 4$  Ом,  $R_{Пл} = 30$  Ом,  $R_h = 1000$  Ом и  $i = 7$  получим  $I_{h2} \approx 129$  мА, что представляет угрозу для жизни человека.

При обрыве любого из фазных проводов и отсутствии касания оборванного провода земли (рисунок 1.5) прикосновение человека к этому проводу приведёт к протеканию через его тело тока  $I_h$ , равного

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_{3У.ТП} + R_h} \quad (1.2)$$

При указанных ранее параметрах  $R_{3У.ТП}$  и  $R_h$  ток через тело человека будет равен 220 мА, т.е. вызовет летальный исход.

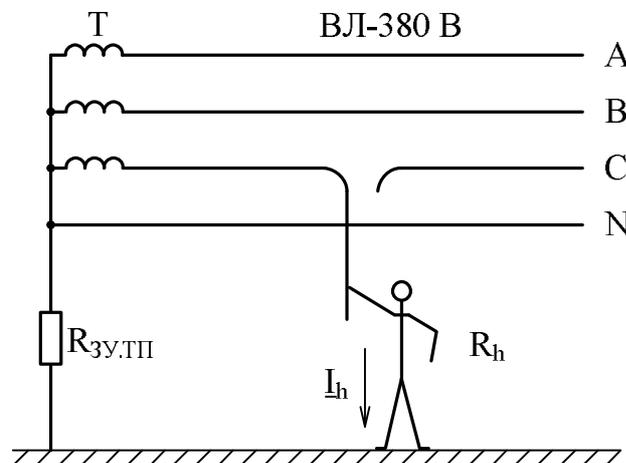


Рисунок 1.5 – Схема электрической сети при обрыве фазного провода

Падение же фазного провода на землю приведёт к появлению поля растекания тока однофазного замыкания на землю. В этом случае возможно поражение напряжением шага. Заметим, что возможные величины напряжения шага будут определяться площадью контакта провода с землёй, удельным сопротивлением земли в месте падения. Этот вопрос подробно описан в [71].

Таким образом, обрыв фазного или нулевого проводов создаёт предпосылки к возникновению электропоражений. Учитывая это, необходимо проанализировать имеющиеся защиты, обеспечивающие отключение сети при возникновении указанных повреждений.

### **1.3 Существующие методы и средства защиты электрических сетей напряжением 380 В от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии**

#### **1.3.1 Общие положения**

Для повышения качества, надежности и безопасности электроснабжения потребителей необходимо осуществление целого ряда мероприятий, в том числе совершенствование устройств защиты, особенно устройств для обнаружения опасных повреждений (однофазных коротких замыканий и обрывов проводов линий) в воздушных сетях напряжением 380 В.

Электроснабжение потребителей осуществляется, в основном, от трансформаторных подстанций (ТП) напряжением 6–10/0,4 кВ, имеющих силовые трансформаторы со схемой соединения «звезда – звезда с нулем». Электрические сети напряжением 380 В выполняются, как правило, воздушными, четырехпроводными с многократным заземлением нулевых проводов линий. Наряду с трехфазными потребителями, сети питают большое число однофазных потребителей. Последнее обуславливает несимметрию токов по фазам ВЛ-380 В и наличие, в связи с этим, тока в нулевом проводе, достигающего значения до 50% от рабочего фазного тока и более. Через повторные заземления ток нулевого провода отсасывается в нуле-

вые провода соседних линий и в заземляющий провод нейтрали силового трансформатора ТП [1, 7, 20, 32, 50, 110, 111].

Защита электрических сетей напряжением 380 В практически осуществляется плавкими предохранителями и автоматическими выключателями. Указанные защиты работают не всегда удовлетворительно, из-за малых кратностей токов короткого замыкания, температурной нестабильности характеристик тепловых расцепителей, низкого уровня эксплуатации и т.п. [2, 19, 26, 74, 108, 109].

### **1.3.2 Защиты, построенные на использовании напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательности**

При возникновении продольной несимметрии электрической сети, например, при обрывах фазных и нулевых проводов линии электропередачи меняются напряжения фаз относительно нулевого провода, перераспределяются токи в электрической сети и одновременно появляются симметричные составляющие напряжений и токов обратной и нулевой последовательности [38, 39, 89]. Информация о напряжениях и токах прямой, обратной и нулевой последовательности может быть использована при построении защит от возникающих несимметричных режимов работы электрической сети [2, 20, 106].

На рисунке 1.6,а показана структурная схема устройства защиты, для работы которого используется информация о токах обратной последовательности [103]. В конце линии питается трёхфазный двигатель М. В цепи питания установлен фильтр токов обратной последовательности ФТОП. При обрыве фазного провода питающей линии нарушается симметрия фазных токов и на выходе ФТОП появляется сигнал, пропорциональный токам обратной последовательности, что приводит к срабатыванию блока защиты БЗ и, соответственно, к отключению автоматического выключателя QF.

Рассмотренное устройство, устанавливаемое в конце линии перед электрической нагрузкой и обладающее простотой исполнения, может обеспечить только защиту отдельных электроприёмников – отключить линию с оборванным прово-

дом оно не может. Для отключения линии нужно передать отключающий сигнал в её начало.

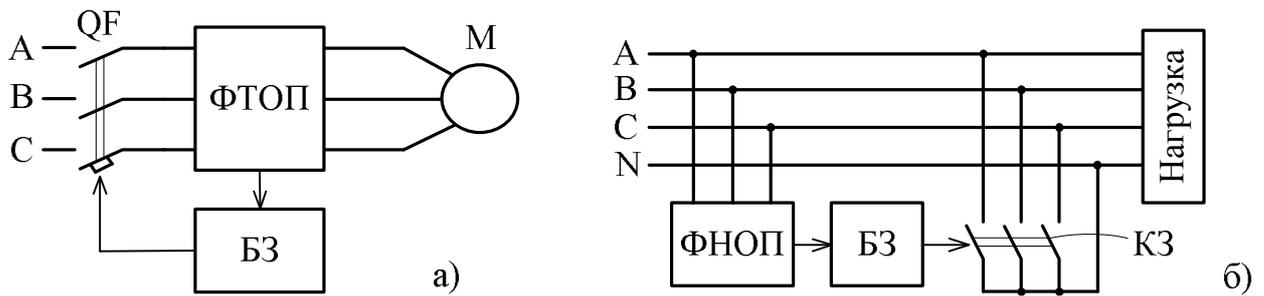


Рисунок 1.6 – Структурные схемы устройств защиты, использующие информацию о токах и напряжениях обратной последовательности

Для устранения этого недостатка институт МИИСП совместно с Союзтехэнерго разработали устройство контроля обрыва проводов УКО-1 [63], которое устанавливается в конце трехфазной воздушной линии (рисунок 1.6,б). Устройство содержит фильтр напряжения обратной последовательности ФНОП, блок защиты БЗ и короткозамыкатель КЗ.

Поскольку при обрыве провода исчезает напряжение одной из фаз в конце линии, это напряжение можно рассматривать как контролируемый параметр. В защите электрических сетей 380 В от обрыва провода [63] контролируют напряжение обратной последовательности.

При возникновении в контролируемой сети неполнофазного режима на выходе ФНОП появляется напряжение обратной последовательности, которое вызывает срабатывание блока защиты БЗ, который воздействуя на короткозамыкатель КЗ, инициирует создание в воздушной линии искусственного короткого замыкания (двухфазного или однофазного в зависимости от числа оборванных проводов). Защита, установленная в начале линии, должна почувствовать это короткое замыкание и отключить линию с оборванными проводами.

Контроль за напряжением обратной последовательности позволяет отстроиться от несимметрии рабочих токов и фиксировать обрыв одного провода. Но для работы устройства необходимо сигнал об обрыве провода передавать от конца линии к ее началу, где установлен отключающий аппарат. Кроме того, такая за-

щита не может обнаружить обрыв двух проводов сразу, и ее нельзя применять на двух- и однофазных линиях и неполнофазных ответвлениях от трехфазной магистрали [66].

Данное устройство позволяет контролировать обрыв проводов независимо от величины сопротивления заземления упавшего на землю провода, снижает ущерб, связанный с выходом из строя электродвигателей и недоотпуском продукции, а также практически исключает электротравматизм. В тоже время известно, что токовые защиты, устанавливаемые в начале воздушных линий, имеют недостаточную чувствительность к удалённым коротким замыканиям – это может приводить к другим нежелательным последствиям из-за протекания по линии неотключенного тока КЗ.

Для выявления несимметричных режимов работы электрической сети может быть использована информация о напряжениях фаз относительно нулевого провода (рисунок 1.7) [94, 101, 102]. 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.

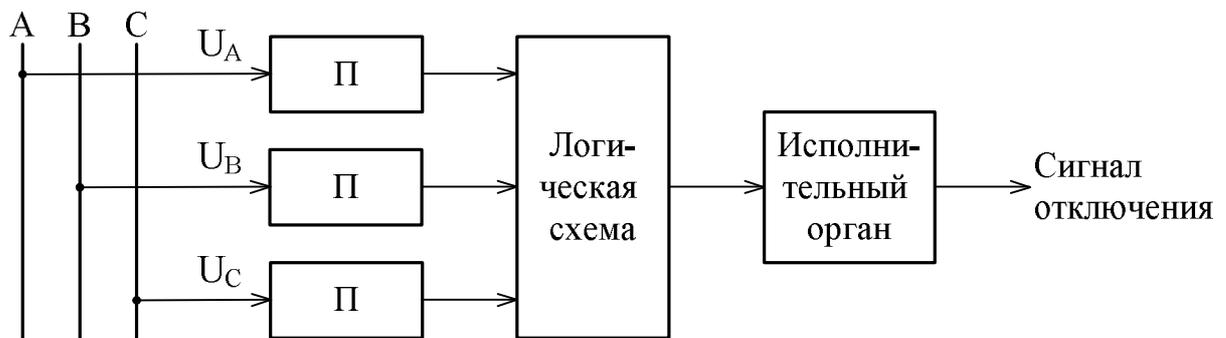


Рисунок 1.7 – Структурная схема устройства защиты, использующая информацию о напряжениях фаз относительно нулевого провода

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 на логический нуль. 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 1.8). 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 [82, 83, 84, 85, 86].

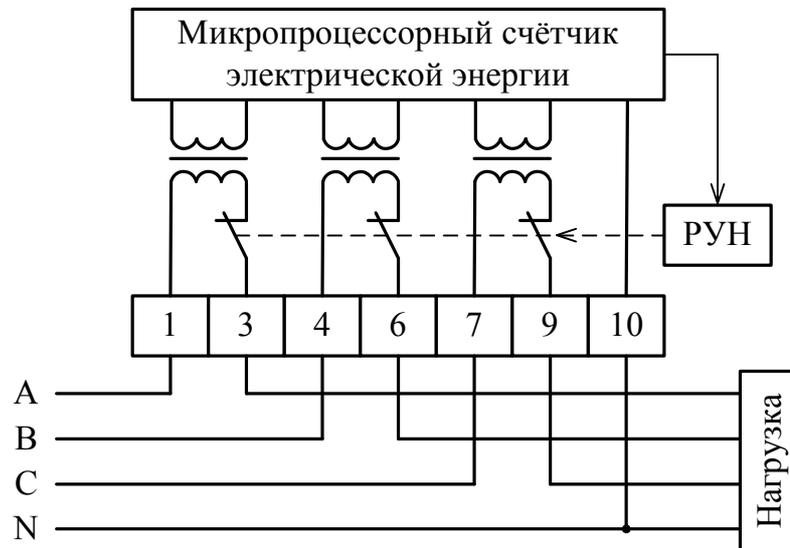


Рисунок 1.8 – Микропроцессорный счётчик

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.

### 1.3.3 Защиты, построенные на использовании наложенных токов

Недостатки, характерные для защит, показанных на рисунке 1.6, отсутствуют в устройстве [30, 66, 91], основанном на использовании трехфазной искусственной системы токов оперативной (непромышленной) частоты, протекающих по трём фазным проводам и земле (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Схема защиты, построенная с использованием наложенного тока

К силовому трансформатору Т через автоматический выключатель QF подключена воздушная линия ВЛ-380 В электрической сети напряжением 380 В с глухозаземлённой нейтралью. Для защиты воздушной линии от обрыва фазного провода в конце воздушной линии установлен источник оперативного тока ИОТ непромышленной частоты 100 Гц, состоящий из RD-цепочек (последовательно соединенных диода VD и резистора R), подключенных к каждому фазному проводу защищаемой линии и образующих нулевую точку, связанную с «землёй».

В начале линии установлен трансформатор тока нулевой последовательности ТТНП, выход которого связан с частотным фильтром Ф. Фильтр Ф настроен на оперативную частоту 100 Гц и связан с пороговым элементом блока защиты БЗ, который воздействует на катушки отключения автоматического выключателя QF. ТТНП, Ф и БЗ установлены в помещении трансформаторной подстанции.

При отсутствии обрыва провода в конце линии к RD-цепочкам прикладываются три фазных напряжения и по ним протекают импульсы тока, которые пред-

ставляют собой полуволны тока 50 Гц, совпадающие по фазе с напряжением той фазы, к которой подключены диод с сопротивлением. Если импульсы тока, протекающего по фазному проводу сети и земле, разложить в ряд Фурье, то наибольшая амплитуда оказывается у второй гармоники тока – поэтому принято говорить, что на электрическую сеть накладывается оперативный ток частоты 100 Гц.

В нормальном режиме работы воздушной линии фазные напряжения сдвинуты на углы, равные  $\pm 2\pi/3$ . Соответственно и оперативные токи источников также сдвинуты на углы  $\pm 2\pi/3$ , т.е. сумма мгновенных значений токов в начале линии равна нулю. Поэтому сигнал на оперативной частоте 100 Гц, снимаемый с трансформатора тока нулевой последовательности ТТНП, отсутствует. Следовательно, блок защиты БЗ ничего не чувствует и ВЛ-380 В находится под напряжением.

При обрыве одного фазного провода, например, фазы С оперативный ток, создаваемый действием RD-цепочек источника оперативного тока ИОТ и подключенных к фазам А и В, в начале линии в ТТНП имеет вид

$$i_{2\Sigma} = i_{2A} + i_{2B} = 0,212 \cdot I_m \cdot \cos(2\omega t + \pi/3). \quad (1.3)$$

При обрыве двух проводов сразу, например, фазы С и В в работе остается лишь RD-цепочка, подключенная к фазе А, и поэтому

$$i_{2\Sigma} = i_{2A} = 0,212 \cdot I_m \cdot \cos(2\omega t). \quad (1.4)$$

Таким образом, при обрыве одного или двух фазных проводов на выходе трансформатора тока нулевой последовательности ТТНП и фильтра Ф появляется одинаковой величины сигнал на оперативной частоте, который вызывает срабатывание блока защиты БЗ, что приводит к отключению автоматическим выключателем QF воздушной линии с оборванными проводами.

Разработанная защита проста и надежна в эксплуатации. Цепь «диод–резистор», использованная в качестве источника оперативного тока, недорога и надежно работает при неблагоприятных атмосферных воздействиях. Предложенную защиту от обрыва проводов можно применять в электрических сетях 380 В и для защиты людей и животных от поражения электрическим током при случайном прикосновении к оборванному проводу.

Для защиты воздушных линий, выполненных в двух- или однофазном исполнении, используется адаптированные для этих случаев подобные устройства защиты [93, 98].

Для устранения влияния на работу защиты несимметрии напряжений сети и пофазного отключения линии (например, при управлении уличным освещением) предыдущее устройство дополнено вторым источником оперативного тока ИОТ2, согласующим трансформатором СТ и трансреактором ТР (рисунок 1.10) [90].

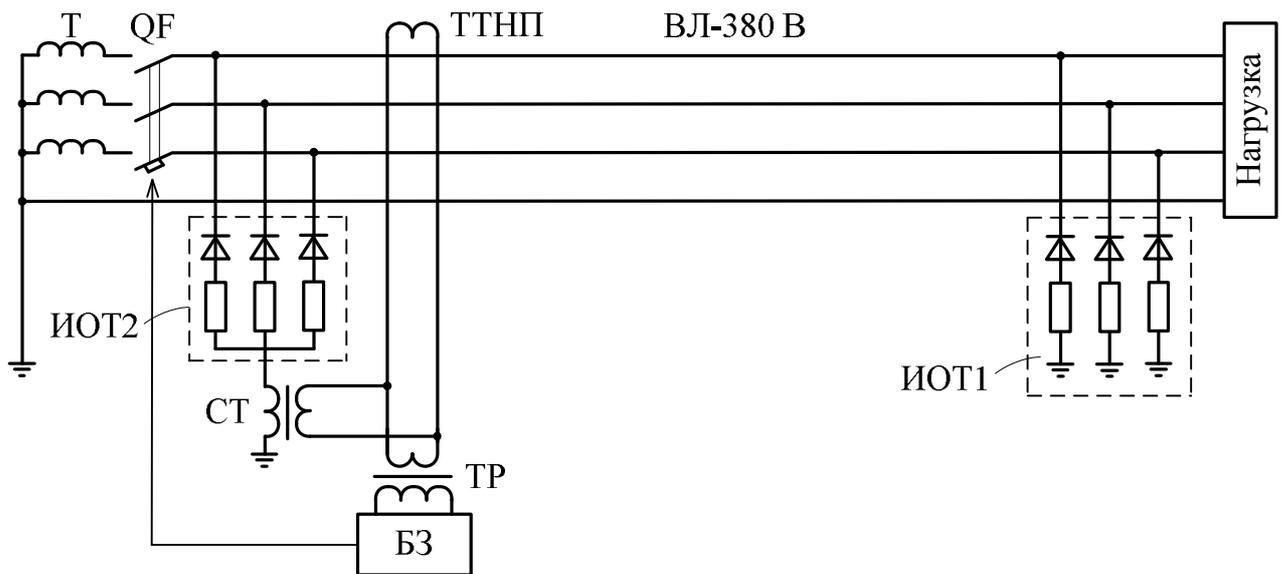


Рисунок 1.10 – Устройство защиты от обрыва проводов с двумя источниками оперативного тока

При отсутствии обрыва фазного провода источники ИОТ1 и ИОТ2 создают одинаковые наложенные токи, которые, суммируясь с разными знаками в первичной обмотке трансреактора ТР, дают нуль. При отключении одного фазного провода выключателем в начале линии наложенные токи от источников ИОТ2 и ИОТ1 изменяются одинаково, следовательно, ток на первичной обмотке трансреактора сохраняется равным нулю.

При обрыве фазного провода в линии наложенный ток источника ИОТ2 остаётся без изменения, а меняется ток источника ИОТ1. В результате на первичной обмотке трансреактора ТР появляется ток, вызывающий срабатывание блока за-

щиты БЗ и отключение автоматическим выключателем QF воздушной линии с повреждением.

Устройство защиты, в котором совмещается использование нескольких информационных параметров (измерение напряжения обратной последовательности и введение в сеть наложенного тока) приведено на рисунке 1.11 [62, 95, 96, 97].

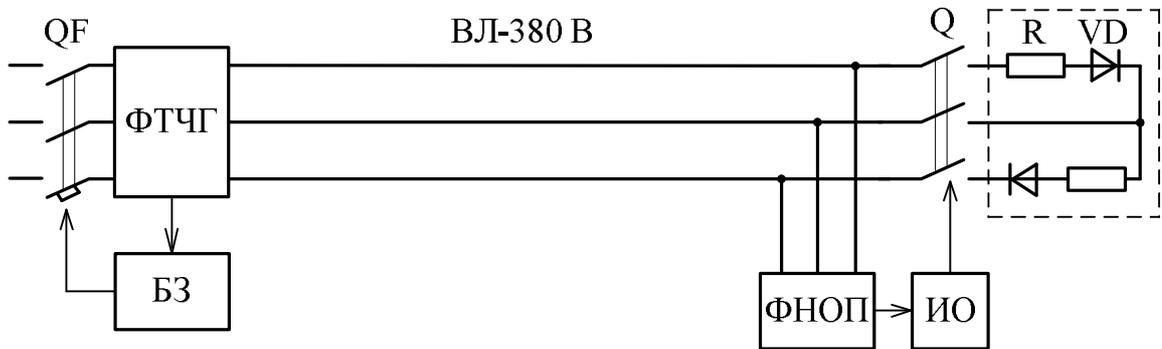


Рисунок 1.11 – Устройство защиты, использующее для работы напряжение нулевой последовательности и наложенный ток

В конце защищаемой линии установлен фильтр напряжения нулевой последовательности ФНОП, выход которого подключён к исполнительному органу ИО, управляющему выключателем Q, обеспечивающим подключение к электрической сети RD-цепочек и введение в сеть наложенного пульсирующего тока.

В начале линии устанавливается фильтр токов чётных гармоник ФТЧГ (технически правильно говорить фильтр токов чётной гармоники, т.к. используется токовый фильтр частоты 100 Гц), который через блок защиты БЗ управляет автоматическим выключателем QF.

При обрыве одного из фазных проводов линии на выходе ФНОП появляется сигнал, пропорциональный напряжению обратной последовательности, срабатывает ИО, включающий выключатель Q, и, благодаря RD-цепочкам, по линии начинает протекать наложенный ток частоты 100 Гц, который фиксируется ФТЧГ. В результате срабатывает блок защиты БЗ и отключает выключателем QF воздушную линию с повреждением. Благодаря такому техническому решению для выявления обрыва фазных проводов используется наложенный ток вместо создаваемого искусственного короткого замыкания.

Одним из вариантов контроля целостности нулевого провода четырёхпроводной электрической сети является введение тока не промышленной частоты в цепь нулевого провода, который затем замыкается по фазам электрической сети. На рисунке 1.12 показана структурная схема устройства, реализующего такой способ защиты [99].

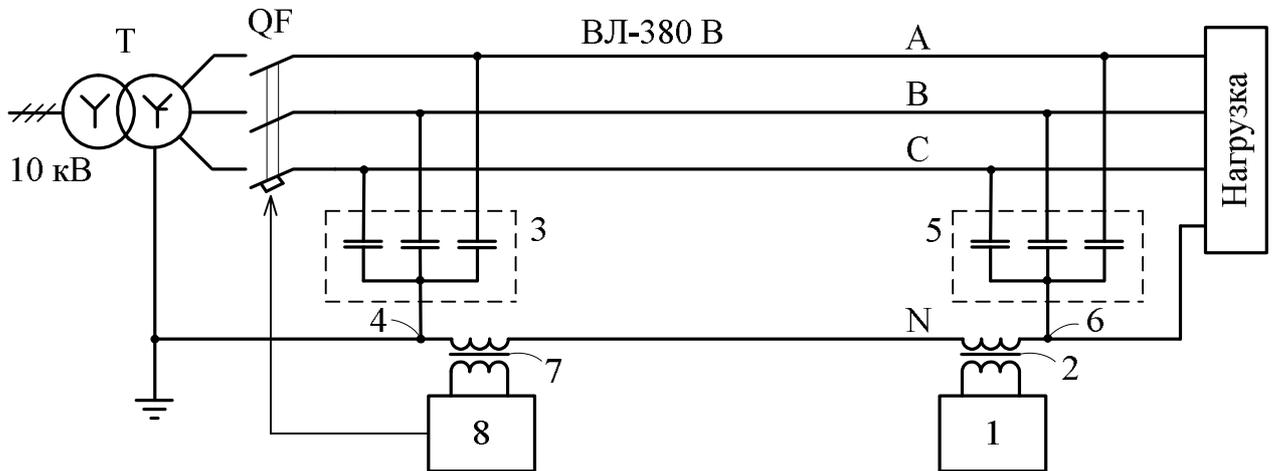


Рисунок 1.12 – Устройство защиты от обрыва нулевого провода

Устройство состоит из генератора 1 переменного напряжения не промышленной частоты, передающего трансформатора 2 связи, первичная обмотка которого подключена к генератору 1, а вторичная обмотка включена последовательно в цепь нулевого провода N. Для создания контура циркуляции тока не промышленной частоты используются две группы по три конденсатора, соединённых в «звезду». Одни выводы первой группы конденсаторов 3 подключены к фазам сети в начале линии, питающей нагрузку, а вторые выводы соединены между собой и с точкой 4 подключения к нулевому проводу. Выводы второй группы конденсаторов 5 подключены к фазам сети в конце линии (около потребителя), а вторые выводы соединены между собой и с точкой 6 подключения к нулевому проводу. В схеме предусмотрен приёмный трансформатор связи 7, установленный в начале линии. Первичная обмотка трансформатора 7 включена последовательно в цепь нулевого провода N, а вторичная обмотка питает блок защиты 8, выход которого подключен к автоматическому выключателю QF в начале ВЛ-380 В.

При отсутствии обрыва нулевого провода сигнал генератора 1 передается по цепи, состоящей из обмоток трансформаторов 2 и 7, нулевого провода, конденсаторов 3, 4 и фазных проводов. При наличии сигнала блок защиты 8 не выдаёт никакого сигнала в обмотку отключения автоматического выключателя QF, он находится во включенном состоянии – так обеспечивается контроль целостности нулевого провода.

При обрыве нулевого провода нарушается цепь прохождения тока промышленной частоты по названному выше контуру, что приводит к отключению автоматического выключателя QF, обесточивающего ВЛ-380 В.

Известно несколько устройств, использующих наложение на напряжения электрической сети оперативного постоянного тока [59, 108, 109]. Например, в [100] для создания цепи протекания этого тока используются трёхфазные дроссели (по аналогии с двумя группами конденсаторов). Устройство содержит источник оперативного постоянного тока, основной трёхфазный дроссель, с помощью которого осуществляется введение тока в сеть, дополнительный трёхфазный дроссель, с помощью которого замыкается цепь постоянного тока и реагирующий орган.

Недостатком устройства, использующего наложение на напряжение сети оперативного тока, является контроль непрерывности лишь одного участка нулевого провода, а, кроме того, ухудшение качества электроэнергии.

Для выявления обрыва нулевого провода может быть использовано пропускание высокочастотных импульсов через нулевой провод и совокупность повторных заземлителей защищаемых линий, приём импульсов, их дешифрацию, регистрацию амплитуды импульсов и подачу сигнала на отключение линии при значениях амплитуды импульсов ниже определенной величины – более чем на 15% от амплитуды импульсов в нормальном режиме работы [77, 81].

На рисунке 1.13 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 ВЛ1, 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.

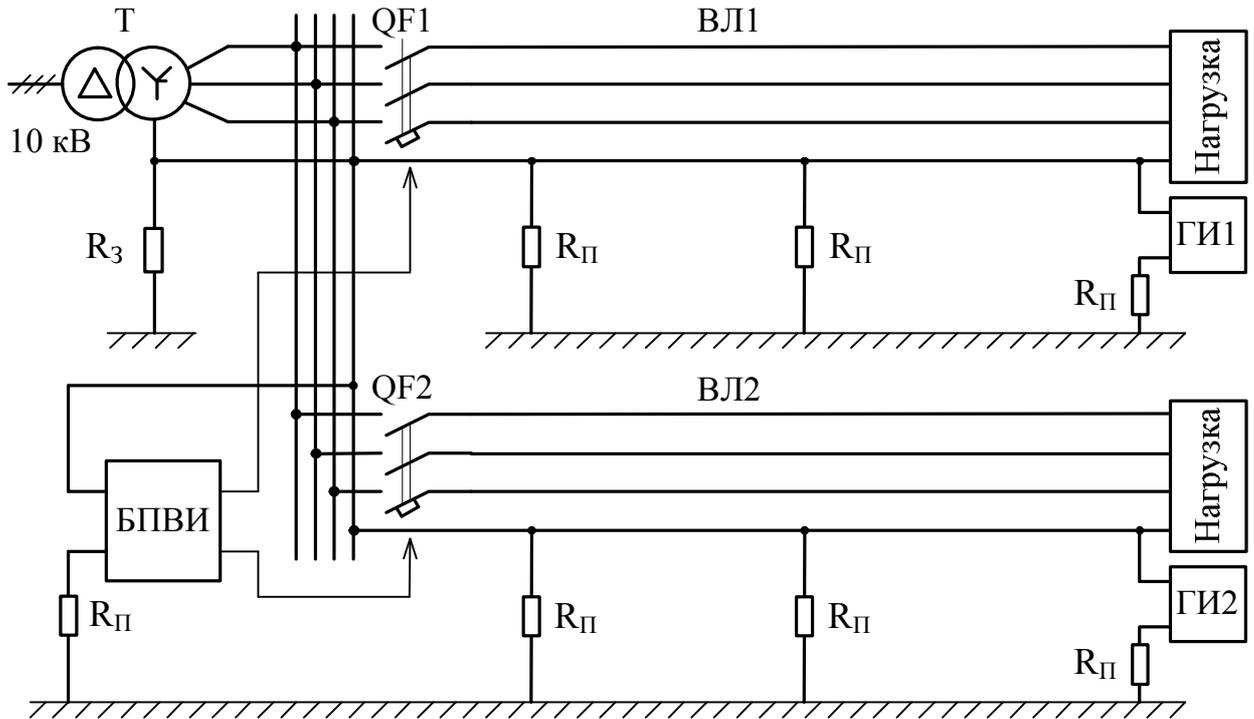


Рисунок 1.13 – Структурная схема устройства контроля состояния нулевого провода, построенного на использовании высокочастотных импульсов

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.

### 1.3.4 Защита, построенная на использовании частотно-импульсных сигналов

В [23, 92] описывается защита ВЛ напряжением 380 В, в принципе действия которой лежит контроль длительности тестового сигнала (рисунок 1.14). Устройство 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 устанавливаются в начале линии. В конце линии устанавливаются три конденсатора С, каждый из которых одним выводом соединен с одним из фазных проводов линии, а другие выводы соединены вместе и подключены к нулевому проводу.

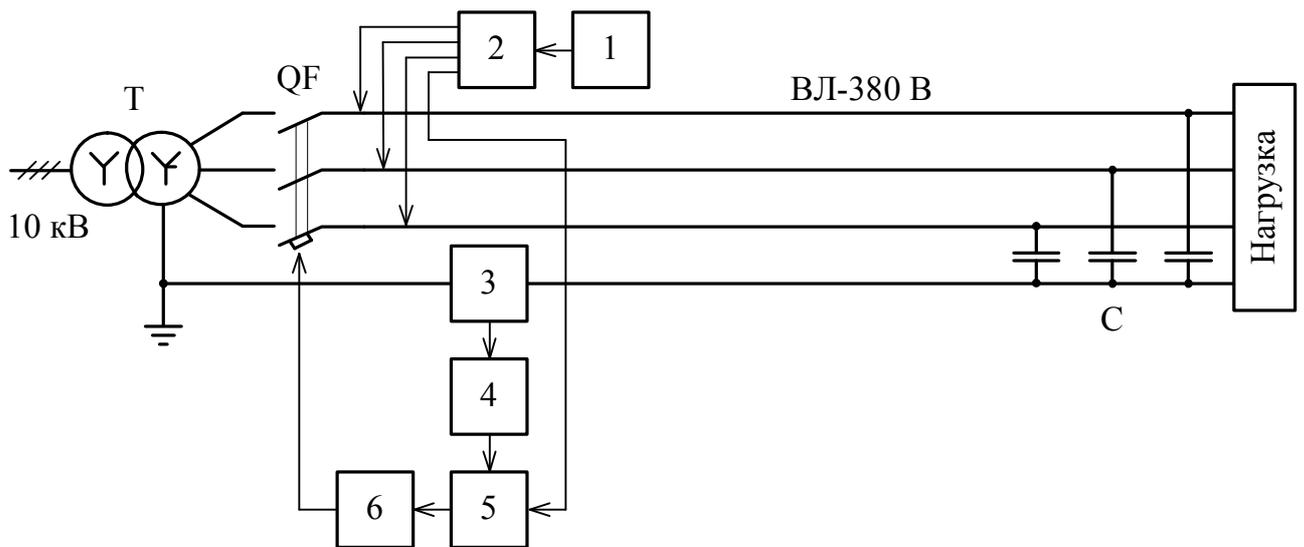


Рисунок 1.14 – Функциональная схема частотно-импульсной защиты

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

$$0 < \tau_2 < \tau_1, \quad (1.5)$$

Этот импульс подается на второй вход схемы 5 сравнения 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 (1.5), 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.

Авторами защиты рассматривался также вариант защиты, выполненной на основе контроля амплитуды синусоидального сигнала, которая обладает наилучшими характеристиками по сравнению с рассмотренной защитой. Основной отличительной особенностью схемы с контролем амплитуды сигнала является то, что здесь вместо генератора прямоугольных импульсов 1 используется генератор синусоидальных сигналов [23]. Срабатывание защиты при ОКЗ и обрыве фазного или нулевого проводов происходило при снижении амплитуды тестового сигнала (в нормальном режиме контур, образованный проводами линии и нагрузочными конденсаторами настроен в режим близкий к резонансу). Однако защита является довольно сложной в конструктивном отношении. К тому же при обрыве нулевого провода тестовый сигнал может пройти через повторное заземление нулевого



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 1.15,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 значения  $I_3$ , блок БС генерирует сигнал и через исполнительный блок ИБ отключает питающий трансформатор Т.

Кроме того, устройство содержит блок проверки симметрии (на рисунке 1.15 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 [77]. Кроме того, при отсутствии нагрузки исчезает информация о токах и, следовательно, теряется контроль за состоянием нулевого провода.

Для контроля состояния нулевого провода может быть использовано соотношение между другими токами – между током  $I_{01}$  в нулевом проводе в начале линии и током  $I_{02}$  в нулевом проводе за первым повторным заземлителем [69, 70, 76]. При обрыве нулевого провода разность токов  $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$  увеличивается, что служит признаком возникновения аварийного режима электрической сети.

### 1.3.6 Защита, построенная на использовании дифференциальных токов

Для выявления обрывов фазных и нулевого проводов может быть использовано измерение дифференциальных токов в пятипроводной электрической сети напряжением 380 В с глухо заземлённой нейтралью. На рисунке 1.16,а приведена схема устройства защитного отключения [36, 104]. 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.

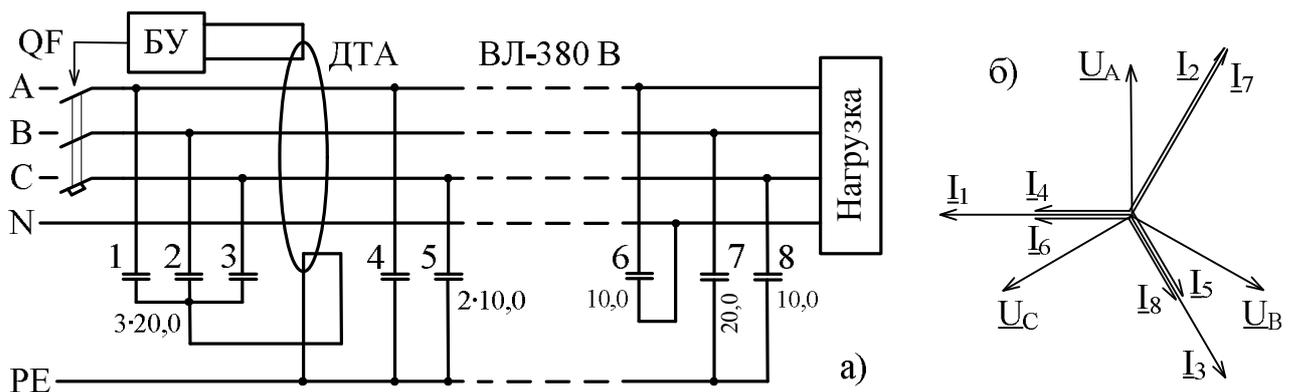


Рисунок 1.16 – Схема устройства защитного отключения

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 присоединённому 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 установлены 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 1.16,б)

$$\Sigma_1 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \quad (1.6)$$

$$\Sigma_2 = \dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6 + \dot{I}_7 + \dot{I}_8 = 0. \quad (1.7)$$

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 ну-

левыми рабочим и защитным проводниками, во-вторых, оно не может быть применено в воздушных линиях с повторными заземлителями нулевого провода.

#### **1.4 Задачи исследования**

Проведённый анализ литературных источников по проблеме защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий электрических сетей напряжением 380 В с глухозаземлённой 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.

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.

Несмотря на наличие достаточно большого количества способов и устройств защиты от обрывов проводов воздушной линии, следует отметить, что в настоящее время отсутствует их какое-либо внедрение как в сельских электрических сетях, так и посёлках городского типа. А, точнее нужно отметить, что в настоящее время в электрических сетях напряжением 380 В практически отсутствуют какие-либо защиты, позволяющие выявлять обрывы фазных и нулевого проводов.

Напряжения обратной и нулевой последовательностей появляются на участке воздушной линии после места обрыва фазных и нулевых проводов. Следовательно, эти защиты, построенные с использованием информации о напряжениях обратной и нулевой последовательностей, должны устанавливаться в конце линии, чтобы они могли выявлять обрывы проводов.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие задачи исследования:

1. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования напряжений, возникающих в электрической сети при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В.
2. На основании указанных исследований обосновать критерии выявления обрывов фазных и нулевого проводов указанных линий.
3. Разработать систему защиты при обрывах фазных и нулевого проводов, основанную на измерении режимных параметров воздушных линий напряжением 380 В.
4. Провести комплексные испытания разработанной системы защиты и оценить повышение уровня электробезопасности в результате её внедрения в практику эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОБРЫВАХ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В

Для определения структуры системы распознавания (системы защиты) обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий электрической сети напряжением 380 В нужно, с одной стороны, знать параметры электрической сети (напряжения и токи) при аварийных режимах её работы, на которые они должны реагировать, а с другой стороны, параметры нормальных режимов работы электрической сети, от которых следует отстраиваться [2, 106, 112].

Решение задачи необходимо разделить на следующие части:

1. Анализ нормальных режимов работы электрической сети, на которые устройства защиты не должны реагировать.
2. Анализ режимов работы воздушных линий, связанных с обрывами фазных и нулевого проводов (и опасных как для людей и животных, так и подключенных к электрической сети электроприёмников).
3. Анализ режимов работы электрической сети, обусловленных другими видами повреждений воздушной линии.
4. Определение перечня информационных параметров, характеризующих как различные несимметричные, так и нормальные режимы работы воздушных линий.
5. Выявление логических признаков – параметров электрической сети (в нашем случае различного рода напряжений), различающих и характеризующих разные режимы её работы.
6. Определение логических связей между признаками.
7. Построение функциональной схемы системы защиты или анализатора режима работы электрической сети.

## 2.1. Режимы работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями

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 воздушных линий;
- различные сочетания замыканий фазных проводов с нулевым проводом воздушных линий, а также замыканий этих проводов на землю;
- различные короткие замыкания в параллельных воздушных линиях, питающихся от одной трансформаторной подстанции и т.д.

На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема простейшей трёхфазной четырёхпроводной электрической сети, состоящей из трёхфазного трансформатора Т, подключенного к электрической сети напряжением 6–10 кВ, четырёхпроводной воздушной линии напряжением 380 В и нагрузки потребителей электрической энергии в конце линии. На вводе потребителя включен микропроцессорный трёхфазный счётчик электроэнергии.

На рисунке 2.2 приведена схема питания потребителей электрической энергии по ВЛ-380 В, которую мы используем для детального рассмотрения возможных режимов работы электрической сети напряжением 380 В.

На рисунках 2.1 и 2.2 используются следующие обозначения:

$R_{з.тп}$ ,  $R_{п}$ ,  $R_{з.л}$  – сопротивления заземляющих устройств трансформаторной подстанции, повторных заземлений нулевого провода ВЛ-380 В и потребителя электроэнергии;

$S_{н}$ ,  $Z_{н}$  – мощность и сопротивление нагрузки потребителя;

АВ – однофазные автоматические выключатели, обеспечивающие коммутацию и защиту потребителя электрической энергии;

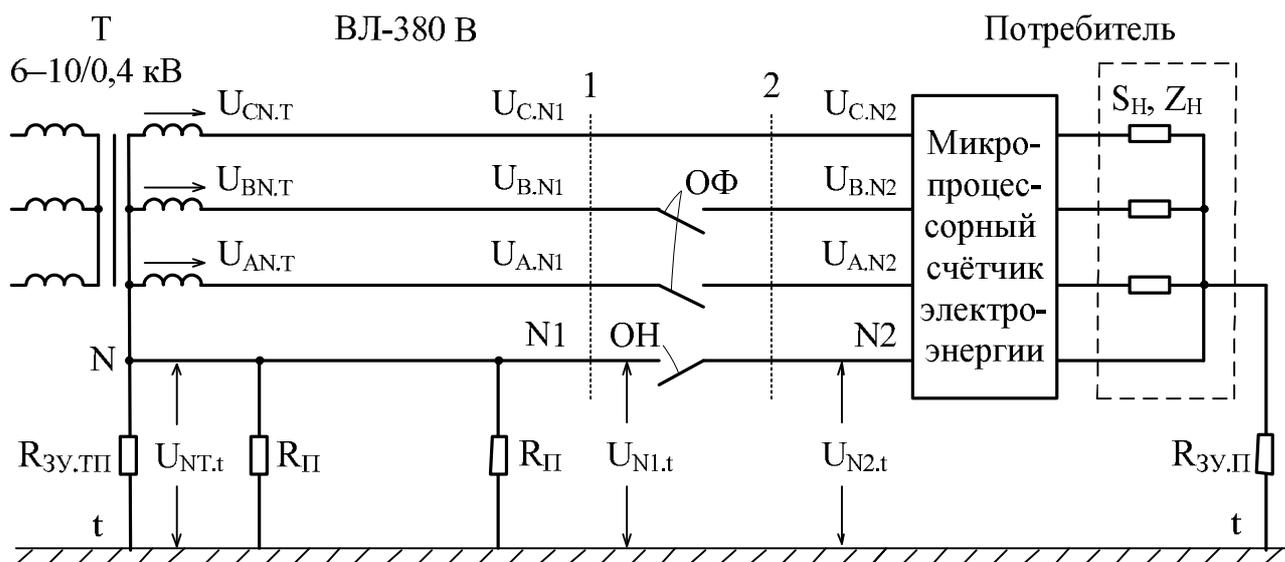


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В

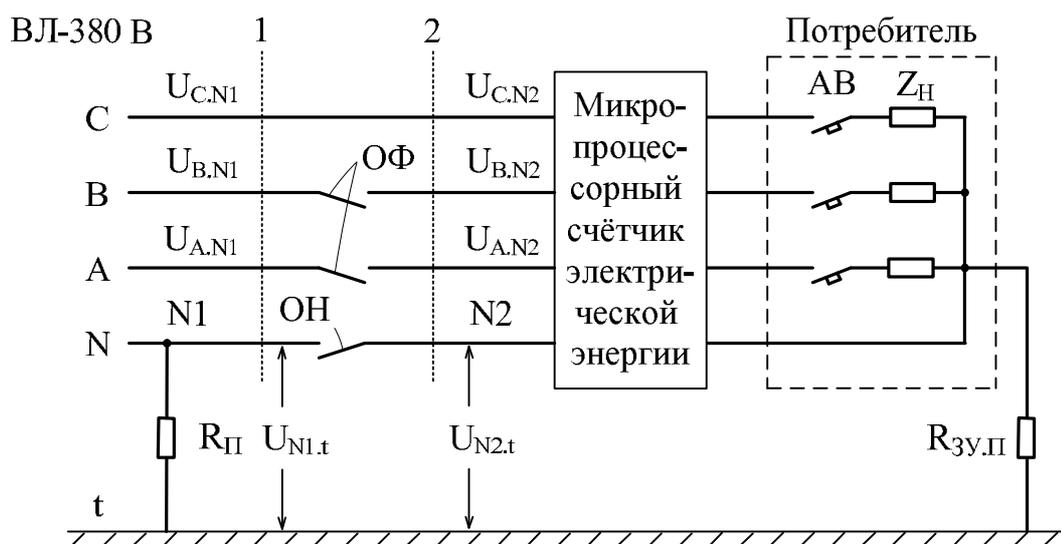


Рисунок 2.2 – Схема питания потребителей электрической энергии по ВЛ-380 В

А, В, С и N – обозначение соответственно фазных проводов и нулевого рабочего провода (далее будем использовать термин «нулевой провод») ВЛ-380 В электрической сети с системой заземления TN-C;

t – потенциал земли;

1 и 2 – пунктирные линии (сечения), обозначающие место возникновения различных видов повреждений ВЛ-380 В. Эти две линии разделяют ВЛ на два участ-

ка – до и после места повреждения линии (от начала ВЛ до места повреждения и от места повреждения ВЛ до 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;

$U_{NT.t}$ ,  $U_{N1.t}$ ,  $U_{N2.t}$  – напряжение между нулевым проводом N и землёй t в соответствующих точках ВЛ;

С целью упрощения записей введём следующие обозначения:

НР – нормальный режим;

ОФ – обрыв фазного провода;

ОН – обрыв нулевого провода;

Откл – отключение автоматического выключателя АВ в одной из фаз потребителя;

vario и const – состояния фазных нагрузок потребителя  $S_{H.A}$ ,  $S_{H.B}$ ,  $S_{H.C}$ ;

ОКЗ – однофазное короткое замыкание;

ДКЗ – двойное короткое замыкание – замыкание двух фазных проводов с нулевым проводом;

ТКЗ – трёхфазное короткое замыкание – замыкание между тремя фазными проводами;

МКЗ – междуфазное короткое замыкание – замыкание между двумя фазными проводами.

Составим перечень возможных режимов (подрезимов) работы электрической сети напряжением 380 В с четырёхпроводной воздушной линией, питающей потребителя электрической энергии, некоторая часть которых описана в работах [19, 38, 39, 98, 99]. Режимы работы определяются:

1. Состоянием воздушной линии. Она может находиться в нормальном режиме работы, в линии могут происходить обрывы фазных и нулевых проводов с их падением на землю и без них, в линии могут возникать различные варианты коротких замыканий.

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, трансформаторной подстанции, повторных заземлений нулевого провода воздушной линии и потребителя.

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.

Целью исследования режимов работы является:

1. Выявление напряжений, опасных для живых организмов (людей и животных) и электрооборудования потребителей.

2. Выявление характерных изменений напряжений, которые могут быть использованы для распознавания режимов работы электрической сети и построения соответствующих устройств защиты.

На рисунке 2.3 показано графическое представление возможных эксплуатационных 34 подрежимов работы электрической сети напряжением 380 В. В таблице 2.1 приведён перечень этих подрежимов, охваченных исследованиями, и их характерные особенности. С целью обеспечения удобства чтения и восприятия информации заполнение таблице 2.1 выполнено с малой плотностью. Отсутствие данных в ячейках, несущих информацию о состоянии проводов ВЛ-380 В и автоматических выключателей АВ, установленных в щитках потребителей, свиде-

тельствуют об отсутствии обрывов проводов и рабочем (включенном) состоянии указанных автоматических выключателей.

Рассмотрим подробнее каждый из подрежимов работы электрической сети:

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

Режим 1. Нагрузка потребителя симметрична во всех трёх фазах и равна 100 % максимальной рабочей нагрузки  $P_{Н.МАКС}$  (активно-индуктивной или чисто активной  $P_{НАГР}$ ).

**Примечание.** Последующие исследования влияния характера нагрузки (от активно-индуктивного до чисто активного в пределах изменения  $\text{tg}\varphi$  от единицы до нуля) на напряжения электрической сети показали, что характер нагрузки потребителей практического влияния не оказывает. Поэтому все исследования проведены при чисто активной нагрузке.

Режим 2. Нагрузка потребителя меняется в одной фазе в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$  при постоянных нагрузках в двух других фазах, равной 100 %. Несимметричное изменение нагрузки по фазам приводит к искажению линейных и фазных напряжений электрической сети, а также к появлению напряжения несимметрии  $U_{НС}$  системы трёх фазных напряжений относительно нулевого провода ВЛ-380 В.

Режим 3. Нагрузка потребителя изменяется одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$  при неизменной нагрузке в третьей фазе, равной 100 %.

Режимы 4, 5, 6. Отключение автоматических выключателей, установленных у потребителя, в одной или одновременно в двух фазах подобно предельным состояниям режимов 2 и 3, когда  $P_{Н.МАКС} = 0$  % при изменении нагрузки в работающих фазах. Следовательно, это приводит к возникновению несимметричного режима работы электрической сети.

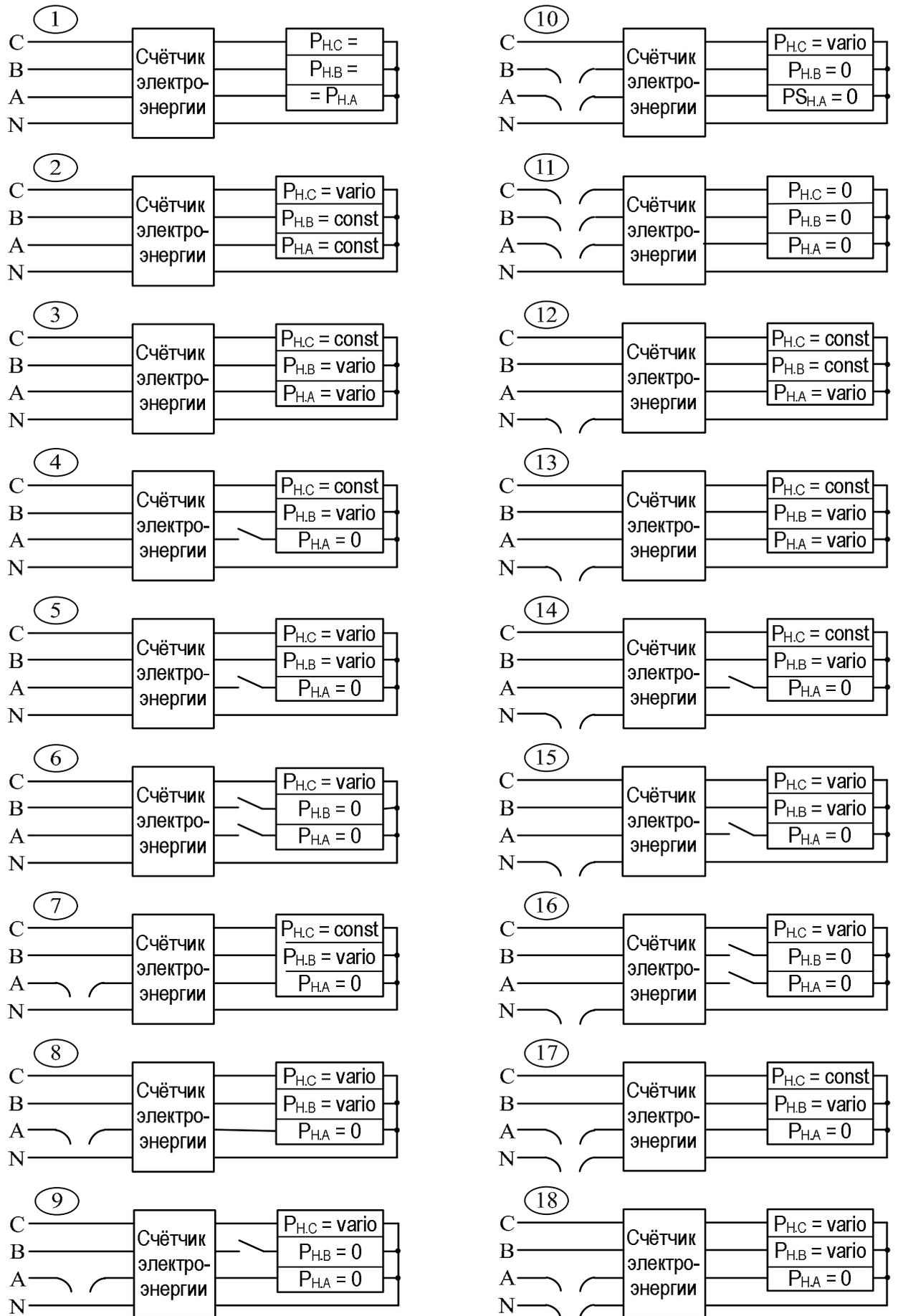
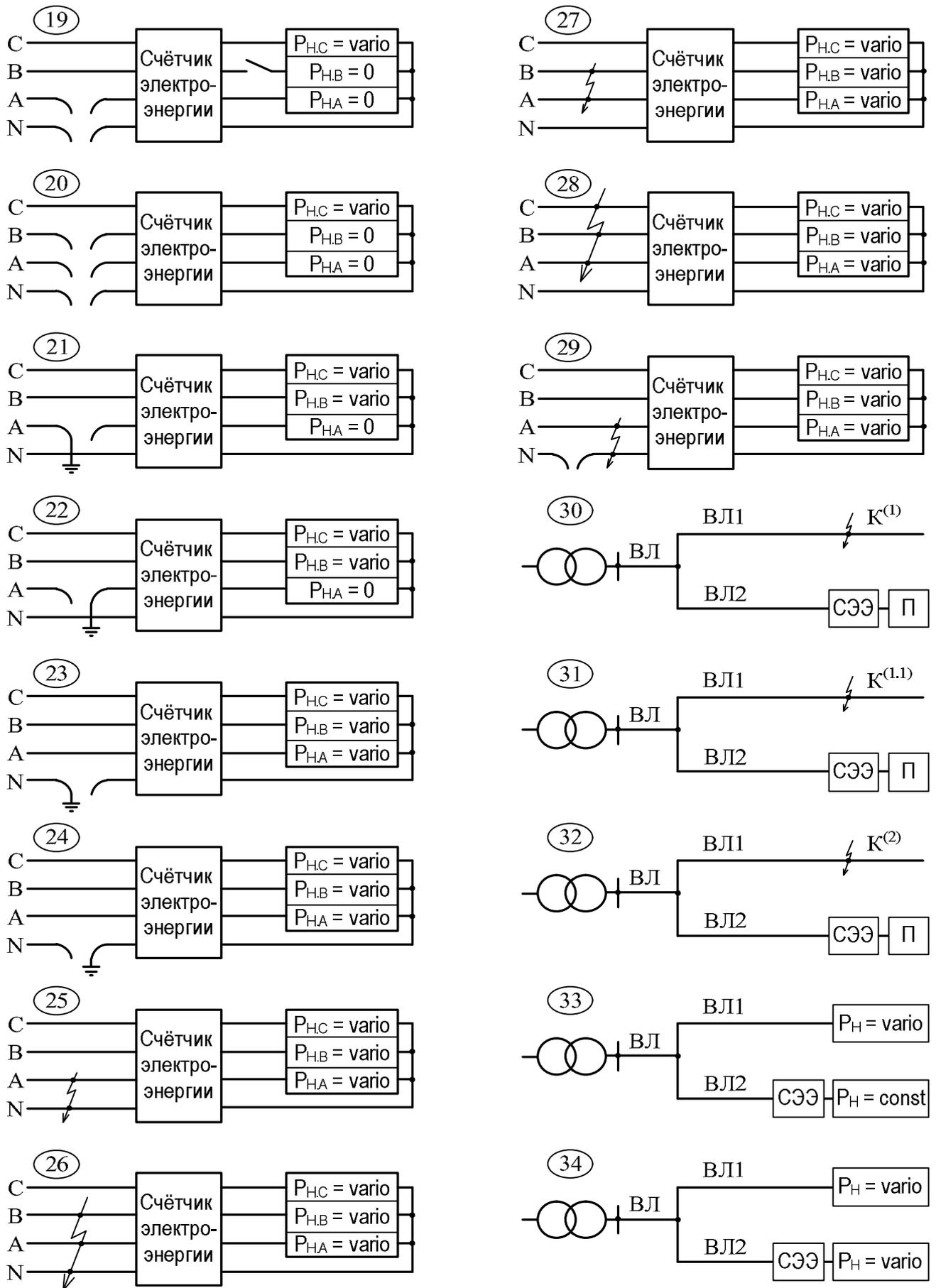


Рисунок 2.3 – Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В



Окончание рисунка 2.3 – Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В

Таблица 2.1 – Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В с четырёхпроводной воздушной линией и режимы изменения электрической нагрузки потребителя

№ режима, схемы	Краткое описание режимов работы сети и их условные обозначения	Состояние фазных проводов			Состояние нулевого провода	Состояние автоматических выключателей, установленных в фазах потребителя			Режимы изменения нагрузки потребителя $S_H$		
		A	B	C		A	B	C	A	B	C
		<i>1. Нормальный режим работы воздушной линии ВЛ-380 В (НР ВЛ)</i>									
1	НР ВЛ, симметричная 100 %-я нагрузка по фазам								const	const	const
2	НР ВЛ, изменение нагрузки в одной фазе при постоянной 100 %-й нагрузке в двух других фазах								const	const	vario
3	НР ВЛ, изменение нагрузки в двух фазах при постоянной 100 %-й нагрузке в третьей фазе								vario	vario	const
4	НР ВЛ, отключение АВ в одной фазе (фаза А), изменение нагрузки в фазе В при постоянной нагрузке в фазе С						Откл		0	vario	const
5	НР ВЛ, отключение АВ в одной фазе, изменение нагрузки в двух фазах						Откл		0	vario	vario
6	НР ВЛ, отключение АВ в двух фазах, изменение нагрузки в третьей фазе						Откл	Откл	0	0	vario
<i>2. Обрывы фазных проводов ВЛ-380 В (ОФ)</i>											
7	ОФ в одной фазе (фаза А), изменение нагрузки в фазе В при постоянной нагрузке в фазе С	ОФ							0	vario	const
8	ОФ в одной фазе (фаза А), изменение нагрузки в фазах В и С	ОФ							0	vario	vario
9	ОФ в одной фазе (фаза А), отключение АВ в фазе В, изменение нагрузки в фазе С	ОФ					Откл		0	0	vario
10	ОФ двух фаз, изменение нагрузки в третьей фазе	ОФ	ОФ						0	0	vario
11	ОФ трёх фаз	ОФ	ОФ	ОФ					0	0	0

Продолжение таблицы 2.1

№ ре- жи- ма, схе- мы	Краткое описание режимов работы сети и их условные обозначения	Состояние фазных проводов			Состоя ние ну- левого прово- да	Состояние автома- тических выключа- телей, установлен- ных в фазах потре- бителя			Режимы изменения нагрузки потребителя S <sub>H</sub>		
		A	B	C		A	B	C	A	B	C
<b>3. Обрыв нулевого провода ВЛ-380 В (ОН)</b>											
12	ОН, изменение нагрузки в одной фазе				ОН				vario	const	const
13	ОН, изменение нагрузки в двух фазах				ОН				vario	vario	const
14	ОН, отключение АВ в одной фазе, изменение нагрузки в одной фа- зе				ОН		Откл		0	vario	const
15	ОН, отключение АВ в одной фазе, изменение нагрузки в двух фа- зах				ОН		Откл		0	vario	vario
16	ОН, отключение АВ в двух фазах, изменение нагрузки в одной фа- зе				ОН		Откл	Откл	0	0	vario
<b>4. Одновременный обрыв фазных и нулевого проводов</b>											
17	ОФ одной фазы, ОН, изменение нагрузки в одной фазе				ОН				0	vario	const
18	ОФ одной фазы, ОН, изменение нагрузки в двух фазах				ОН				0	vario	vario
19	ОФ одной фазы, ОН, отключение АВ во второй фазе, изменение нагрузки в третьей фазе				ОН			Откл	0	0	vario
20	ОФ двух фаз и ОН				ОН				0	0	vario
21	ОФ одной фазы с замыканием на землю оборванного фазного про- вода со стороны источника питания (З <sub>1</sub> )								0	vario	vario
22	ОФ одной фазы с замыканием на землю оборванного фазного про- вода со стороны потребителя (З <sub>2</sub> )								0	vario	vario
23	ОН с замыканием на землю оборванного нулевого провода со сто- роны источника питания				ОН+З <sub>1</sub>				vario	vario	vario
24	ОН с замыканием на землю оборванного нулевого провода со сто- роны потребителя				ОН+З <sub>2</sub>				vario	vario	vario

Окончание таблицы 2.1

№ режима, схемы	Краткое описание режимов работы сети и их условные обозначения	Состояние фазных проводов			Состояние нулевого провода	Состояние автоматических выключателей, установленных в фазах потребителя			Режимы изменения нагрузки потребителя $S_n$		
		A	B	C		A	B	C	A	B	C
		<b>5. Короткие замыкания</b>									
25	Однофазное короткое замыкание – замыкание между фазным и нулевым проводами ( $K^{(1)}$ )	ОКЗ						vario	vario	vario	
26	Двойное короткое замыкание – замыкание двух фазных проводов с нулевым проводом ( $K^{(1,1)}$ )	ДКЗ						vario	vario	vario	
27	Междуфазное короткое замыкание между двумя фазными проводами ( $K^{(2)}$ )	МКЗ						vario	vario	vario	
28	Трёхфазное короткое замыкание между тремя фазными проводами ( $K^{(3)}$ )	ТКЗ						vario	vario	vario	
29	ОН с одновременным замыканием между фазным и нулевым проводами со стороны потребителя	ОКЗ <sub>2</sub>			ОН			vario	vario	vario	
30	Однофазное КЗ в параллельной воздушной линии ВЛ1	ОКЗ <sub>ВЛ1</sub>						vario	vario	vario	
31	Двойное КЗ в параллельной воздушной линии ВЛ1	ДКЗ <sub>ВЛ1</sub>						vario	vario	vario	
32	Междуфазное КЗ в параллельной воздушной линии ВЛ1	МКЗ <sub>ВЛ1</sub>						vario	vario	vario	
<b>6. Нормальный режим работы сети с двумя параллельно работающими ВЛ-380 В</b>											
33	Изменение нагрузки в одной фазе А при постоянной 100 %-й нагрузке в других фазах							vario	const	const	
	Изменение нагрузки в двух фазах А и В при постоянной 100 %-й нагрузке в третьей фазе							vario	vario	const	
	Симметричная 100 %-я нагрузка фаз							const	const	const	
34	Одновременное изменение нагрузок в одной фазе А обеих линий при постоянной 100 %-й нагрузке в фазах В и С							vario	const	const	
	Одновременное изменение нагрузок в фазах А и В при постоянной 100 %-й нагрузке в фазе С							vario	vario	const	
								vario	vario	const	

## ***2. Обрывы фазных проводов воздушной линии.***

Режимы 7 и 8. При обрыве одного фазного провода нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне  $100-0\% P_{H.МАКС}$ .

Режим 9. При обрыве одного фазного провода возможно отключение автоматического выключателя во второй фазе и изменение нагрузки на третьей фазе в диапазоне  $100-0\% P_{H.МАКС}$ .

Режим 10. При обрыве двух фазных проводов нагрузка потребителя в оставшейся в работе фазе изменяется в диапазоне  $100-0\% P_{H.МАКС}$ . По нагрузочным характеристикам режимы 9 и 10 подобны, но входные напряжения микропроцессорного счётчика различны – в режиме 9 на счётчик поступают два фазных напряжения относительно нулевого провода, а режиме 10 на счётчик поступает только одно фазное напряжение относительно нулевого провода.

Режим 11. При одновременном обрыве трёх фазных проводов потребитель теряет все фазные напряжения, но при этом он связан с электрической сетью нулевым проводом.

## ***3. Обрывы нулевого провода.***

Режимы 12 и 13. При обрыве нулевого провода нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне  $100-0\% P_{H.МАКС}$ .

Режимы 14 и 15. При обрыве нулевого провода и отключении автоматического выключателя на вводе потребителя изменяется нагрузка на одной фазе в диапазоне  $100-0\% P_{H.МАКС}$ , а на второй сохраняется равной  $100\% P_{H.МАКС}$  или нагрузка изменяется одновременно в двух фазах.

Режим 16. При обрыве нулевого провода и отключении автоматических выключателей двух фаз потребитель теряет питание и оказывается под фазным напряжением неповреждённой фазы, в том числе и его нулевой провод.

## ***4. Одновременный обрыв фазных и нулевого проводов.***

Режимы 17 и 18. При одновременном обрыве одного фазного и нулевого проводов нагрузка изменяется соответственно в одной фазе потребителя или одновременно в двух.

Режим 19. При одновременном обрыве одного фазного и нулевого проводов и отключении автоматического выключателя потребитель теряет питание и оказывается под фазным напряжением неповреждённой фазы, в том числе и его нулевой провод – аналогично режиму 16.

Режим 20. При обрыве двух фазных проводов и нулевого провода ситуация подобна режимам 16 и 19.

Режимы 21 и 22. При обрыве одного фазного провода и его падении на землю (замыкание на землю) соответственно со стороны источника питания ( $Z_1$ ) или со стороны потребителя ( $Z_2$ ) нагрузка может меняться в одной фазе потребителя или одновременно в двух.

Режимы 23 и 24. При обрыве нулевого провода и его падении на землю (замыкание на землю) соответственно со стороны источника питания ( $Z_1$ ) или со стороны потребителя ( $Z_2$ ) нагрузка может меняться в одной фазе потребителя или одновременно в двух.

### ***5. Короткие замыкания.***

Режим 25. Однофазное короткое замыкание (замыкание между фазным и нулевым проводами –  $K^{(1)}$ ).

Режим 26. Двойное короткое замыкание (замыкание двух фазных проводов с нулевым проводом –  $K^{(1.1)}$ ).

Режим 27. Междофазное короткое замыкание между двумя фазными проводами  $K^{(2)}$ .

Режим 28. Трёхфазное короткое замыкание между тремя фазными проводами  $K^{(3)}$ .

Режим 29. Обрыв нулевого провода с одновременным замыканием между фазным и нулевым проводами со стороны потребителя.

Режим 30. Однофазное короткое замыкание в параллельной воздушной линии, питающейся от той же трансформаторной подстанции.

Режим 31. Двойное короткое замыкание в параллельной воздушной линии, питающейся от той же трансформаторной подстанции.

Режим 32. Междофазное короткое замыкание в параллельной воздушной линии, питающейся от той же трансформаторной подстанции.

Режим 33. Различные варианты изменения фазных нагрузок в параллельной воздушной линии при неизменной симметричной нагрузке в исследуемой линии.

Режим 34. Различные варианты одновременного изменения нагрузок в параллельной и исследуемой линиях.

## **2.2 Применение компьютерной модели для исследования режимов работы электрической сети напряжением 380 В**

Анализ работ, приведённый в разделе 1, показывает, что исследованию процессов, происходящих в электрических сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями, уделялось и уделяется большое внимание 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.

На величину фазных напряжений относительно нулевого провода, 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, величины и места расположения повторных заземлителей нулевого провода, сопротивления заземляющих устройств потребителей, степень нагрузки фаз воздушной линии и их несимметрия, наличие разветвлённых параллельно работающих линий, распределение нагрузки вдоль линии и многое другое.

Запись уравнений, описывающих состояние сети, с учётом всех указанных выше факторов, и их аналитическое решение представляется довольно сложным и трудоёмким процессом. Нетрудно предположить, что даже при успешном реше-

нии такой задачи, аналитические выражения для определения напряжений в узлах сети и токов в ветвях получатся громоздкими, включающими в себя большое количество независимых переменных. Использование таких выражений для выявления степени влияния каждого независимого переменного параметра (фактора) на величину и фазу напряжений отдельных фаз сети по отношению к нулевому проводу  $\underline{U}_{\phi.N}$ , и нулевого провода по отношению к земле  $\underline{U}_{N,t}$ , а также и других режимных параметров, потребует не меньше усилий и объёма вычислительной работы, чем прямое решение системы уравнений, описывающих состояние сети.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать о том, что без применения мощной вычислительной техники и соответствующих программных продуктов провести глубокое и всестороннее исследование режимных параметров (токов, напряжений и мощностей) с учётом целого комплекса влияющих факторов было весьма затруднительно.

С появлением мощного и универсального программного комплекса «Matlab» с приложением к нему пакета «Simulink» возникла возможность проведения исследований режимных параметров сети с учётом практически всех обозримых факторов, оказывающих в той или иной степени влияние на интересующие исследователя параметры [3, 107].

С целью проведения достаточно глубоких и всесторонних исследований влияния вышеуказанных факторов на величину токов и напряжений фаз сети, их симметричных составляющих и других параметров нами была создана серия компьютерных моделей электрической сети напряжением 380 В типа TN–С, выполненных воздушными линиями. Модели созданы в программном комплексе «Matlab» с использованием пакета «Simulink».

Подробное описание компьютерной модели простейшей сети, состоящей из последовательно соединённых трёхфазного источника, понижающего трансформатора, неразветвлённой воздушной линии с распределённой нагрузкой, приведено в [9, 10, 11], где дано детальное описание отдельных блоков компьютерной модели сети, а также методики определения параметров, запрашиваемых этими блоками [16, 37, 56].

Адекватность работы компьютерных моделей подтверждена результатами прямых измерений в реальных сетях с ВЛ-380 В Центрального РЭС ПО «Челябинские городские электрические сети» и Еткульского РЭС ПО «Центральные электрические сети» [8, 27]. Следует отметить, что проведение прямых измерений в реальных сетях возможно не во всех эксплуатационных режимах из-за их опасности для оборудования, а в отдельных случаях – для людей и животных. При использовании же компьютерных моделей сетей таких ограничений нет, что открывает широкие возможности для исследования поведения режимных параметров сети при независимом изменении нагрузок её отдельных фаз и других факторов, таких как величина сопротивлений заземляющих устройств подстанций  $R_{ЗУ.ТП}$ , потребителей  $R_{ЗУ.П}$ , повторных заземлителей  $R_{П}$ , обрывы нулевого и фазных проводов как в отдельности, так и совместное, замыкания фазных проводов между собой и каждого из них на нулевой провод, место возникновения в сети указанных видов повреждений, наличие параллельно работающих ВЛ, подключённых к одному трансформатору и т.д.

С целью выявления характерных признаков, свойственных указанным выше видам аварийных режимов работы сетей (рисунок 2.3 и таблица 2.1), в общем случае, различающихся по своей структуре (топологии), были созданы имитирующие их компьютерные модели, такие как:

- последовательно соединённые трёхфазный источник, понижающий трансформатор, воздушная линия напряжением 380 В с сосредоточенной нагрузкой в конце линии, которую можно изменять пофазно;
- то же с двумя параллельно работающими линиями;
- то же с двумя параллельно работающими линиями, одна из которых магистральная с промежуточным отбором мощности, а вторая – разветвлённая с нагрузками в концах ответвлений, причём нагрузки обеих линий также можно изменять пофазно.

Рассмотренные модели были использованы при компьютерном моделировании различных режимов работы электрической сети.

В компьютерных моделях, использованных при исследованиях изменений напряжений при различных режимах работы воздушной линии и несимметрии фазных нагрузок потребителей, приняты параметры обобщенной электрической сети напряжением 380 В (таблица 2.2) и совпадающих с параметрами опытной электрической сети (приложение Б), в которой проведены экспериментальные исследования (раздел 4.3).

Таблица 2.2 – Параметры моделируемой сети

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-4x35 мм <sup>2</sup>	Длина линии	200,0 м
	Сечение проводов	35,0 мм <sup>2</sup>
	Количество проводов	4 шт.
Сопротивления заземляющих устройств	ТП	4,0 Ом
	Повторное заземление нулевого провода ВЛ	28,0 Ом
	Потребителя	0,5–∞ Ом
Предельная (номинальная) активная мощность потребителя $P_{н.макс}$	Одной фазы	28,0 кВт
	Трёх фаз	72 кВт

### **2.3 Исследования на компьютерной модели изменений в электрической сети при различных режимах работы воздушных линий и параметрах нагрузки потребителей**

#### **2.3.1 Исследования влияния несимметрии нагрузок потребителей на напряжения электрической сети при нормальном режиме её работы**

В электрических сетях напряжением 380 В преобладает однофазная нагрузка, подключаемая к трёхфазной электрической сети по схеме «звезда с нулём». Даже при нормальном режиме работы электрической сети однофазная нагрузка нерав-

номерно распределяется по фазам. В результате несимметрии нагрузок однофазных приемников, присоединенных к разным фазам, потери напряжения в фазных проводах воздушной линии будут различны и, соответственно, нарушается симметрия как линейных, так фазных напряжений относительно нулевого провода по длине линии, в том числе, и на вводах потребителей электрической энергии. Одной из характеристик несимметрии трёхфазной системы напряжений является напряжение несимметрии, равное трём напряжениям нулевой последовательности  $\underline{U}_{НС} = 3 \cdot \underline{U}_0$  [38, 39, 89]. Поскольку напряжение нулевой последовательности по величине соизмеримо с фазным напряжением, при исследовании режимов работы электрической сети будем рассматривать именно этот важный режимный параметр.

Исследование нормального режима работы электрической сети необходимо для оценки влияния изменения несимметрии фазных нагрузок на линейные и фазные напряжения и, особенно, на напряжение нулевой последовательности, значения которого может быть использовано в качестве одного логических признаков при идентификации обрыва нулевого провода. Следовательно, нужно знать предельные значения, которые может принимать напряжение нулевой последовательности  $\underline{U}_0$ , чтобы правильно построить систему защиты.

Кроме того, при исследованиях будем измерять напряжения нулевого провода  $N$  относительно земли  $t U_{N,t}$  для оценки условий электробезопасности, например, для случаев, когда человек или животное касается оборванного нулевого провода или его спуска к повторному заземлению.

При исследованиях будем использовать обозначения напряжений, принятые в разделе 2.1 к рисункам 2.1 и 2.2.

В общем случае при всех видах исследований режимов работы электрической сети (на компьютерной и физической моделях, в опытной электрической сети) замеры напряжений производились (рисунки 2.1 и 2.2):

- в начале воздушной линии сразу за трансформатором (напряжения помечены индексом «т»);
- до и после места возникновения обрывов фазных (ОФ) или нулевого (ОН)

проводов; эти места обозначены пунктирными линиями соответственно 1 и 2 (поперечными сечениями воздушной линии) – измеренные напряжения имеют индексы «1» и «2».

Напряжения, измеренные по поперечному сечению воздушной линии 2 за обрывами фазных и нулевого проводов, являются входной информацией для микропроцессорного счётчика, установленного на вводе потребителя электрической энергии. Поэтому в работе представлены результаты измерений напряжений только для этого сечения воздушной линии, а в их обозначении использован индекс «2», например,  $U_{A.N2}$ ,  $U_{B.N2}$ ,  $U_{C.N2}$ ,  $U_{0.2}$ ,  $U_{N2.t}$ .

При исследовании всех режимов работы электрической сети (см. рисунок 2.3 и таблицу 2.1) изменяли следующие параметры электрической сети:

– фазная нагрузка одной фазы изменялась в пределах от 100 % максимальной нагрузки фазы  $P_{H.МАКС}$  до 0 % с шагом 20 % при неизменной максимальной нагрузке на двух других фазах. В некоторых случаях для получения практически предельного случая отсутствия нагрузки на фазе принималась очень маленькая нагрузка в пределах  $0,1-0,001 \% P_{H.МАКС}$ ;

**Примечание.** При исследованиях на физической модели и в опытной электрической сети шаг изменения нагрузки отличался в связи с конкретными значениями нагрузочных резисторов, но это никак не повлияло на полученные результаты.

– фазная нагрузка двух фаз изменялась одновременно в пределах от 100 % максимальной нагрузки фазы  $P_{H.МАКС}$  до 0 % с шагом 20 % при неизменной максимальной нагрузке на третьей фазе.

– сопротивление заземляющего устройства потребителя  $R_{ЗУ.П}$  принималось равным двум предельным случаям, равным 1 Ом (очень малое значение) и  $\infty$  Ом (отключение или отсутствие заземляющего устройства, например, в случае применения потребителем устройства защиты типа УЗО), и равным 30 Ом.

Результаты проведённых исследований на компьютерной и физической моделях и в опытной электрической сети, показали, что наибольшие изменения напряжений на вводе потребителя происходят при отсутствии заземляющего устройства у потребителя, т.е. при  $R_{ЗУ.П} = \infty$  Ом. В связи с этим в работе представлен

анализ изменений напряжений именно при этом значении сопротивления заземляющего устройства потребителя – остальные результаты исследований на компьютерной модели вынесены в приложения В и Г.

Результаты исследования изменений напряжений электрической сети в нормальном режиме в зависимости от несимметрии фазных нагрузок при сопротивлении заземляющего устройства потребителя  $R_{3У.П} = \infty$  Ом, полученных при компьютерном моделировании, приведены в таблице 2.3.

По данным полученных исследований построены графики изменения фазных напряжений относительно нулевого провода  $U_{A.N2}$ ,  $U_{B.N2}$ ,  $U_{C.N2}$ , напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$  и напряжения нулевого провода относительно земли  $U_{N,2t}$  электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителей и при значении сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{3У.П} = \infty$  Ом приведены на рисунках 2.4 и 2.5.

На рисунках 2.6 и 2.7 показаны векторные диаграммы напряжений электрической сети в нормальном режиме работы при отсутствии нагрузки соответственно на одной фазе А и на двух фазах А и В при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3У.П} = \infty$ ).

При анализе этих данных можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки только на одной фазе А от 100 % до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

1.1. Изменяется («деформируется») треугольник линейных напряжений  $U_{AB,2}$ ,  $U_{BC,2}$ ,  $U_{CA,2}$ , причём разница между ними достигает 10-ти %.

1.2. Напряжение на фазе А относительно нулевого провода возрастает со значения  $U_{A.N2} = 210,5$  В до 260,7 В, превышая номинальное значение на 18,5 %.

1.3. Напряжение на фазе В относительно нулевого провода уменьшается со значения  $U_{A.N2} = 210,5$  В до 190 В, т.е. снижение составляет около 10 %.

1.4. Напряжение на фазе С относительно нулевого провода  $U_{C.N2}$  практически не меняется, снижаясь 1–1,5 В.

Таблица 2.3 – Результаты исследования напряжений электрической сети  
в нормальном режиме при  $R_{3y.II} = \infty$  Ом

№ опы- та	Нагрузка фаз % от $P_{H.MAKC}$			Напряжения на вводе потребителя, В/град							
	A	B	C	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{0.2}$	$U_{N2.t}$
1	100	100	100	364,6	364,6	364,6	210,5	210,5	210,5	0	0
				26,3	-93,7	146,3	-3,7	-123,7	116,3	0	0
2	80	100	100	369,5	364,6	367,3	219,1	207,2	209,7	6	2,972
				26,3	-93,7	147	-2,7	-123	115,1	17,5	-178
3	60	100	100	374,9	364,6	370,1	228,3	203,5	209,1	12,6	6,195
				26,3	-93,7	147,7	-1,7	-122	113,8	18,5	-176,9
4	40	100	100	380,6	364,6	373,1	238,3	199,5	208,8	19,72	9,699
				26,3	-93,7	148,4	-0,5	-121,1	112,4	19,65	-175,8
5	20	100	100	386,9	364,6	376,1	249,1	195	208,8	27,49	13,52
				26,35	-93,7	149,3	0,69	-120,1	110,9	20,9	-174,6
6	0	100	100	393,82	364,6	379,31	260,7	190	209,3	35,06	17,68
				26,91	-93,22	150,67	2,042	-119	109,1	21,9	-173,2
7	80	80	100	370,8	367	367,4	218,7	211,4	208	5,27	3,033
				26,6	-93,7	147	-3,3	-122	115,5	-12	122,4
8	60	60	100	378,6	371,9	370,4	227,4	216,5	203,6	11,64	6,46
				27,17	-93,7	147,6	-3,44	-120,5	115	-26,59	124
9	40	40	100	386,6	377	373,7	237,2	221,6	198,7	19,17	10,36
				27,78	-93,63	148,4	-3,58	-118,4	114,2	-29,8	125,7
10	20	20	100	395	382,4	377,5	248	226,9	193,4	27,83	14,81
				28,42	-93,5	149,1	-3,67	-116	113,2	-30,21	127,7
11	0	0	100	404,8	404,8	404,8	260,3	231,9	184,6	37,48	19,94
				29,46	-90,50	149,5	-3,71	-113,1	112	-31,1	130

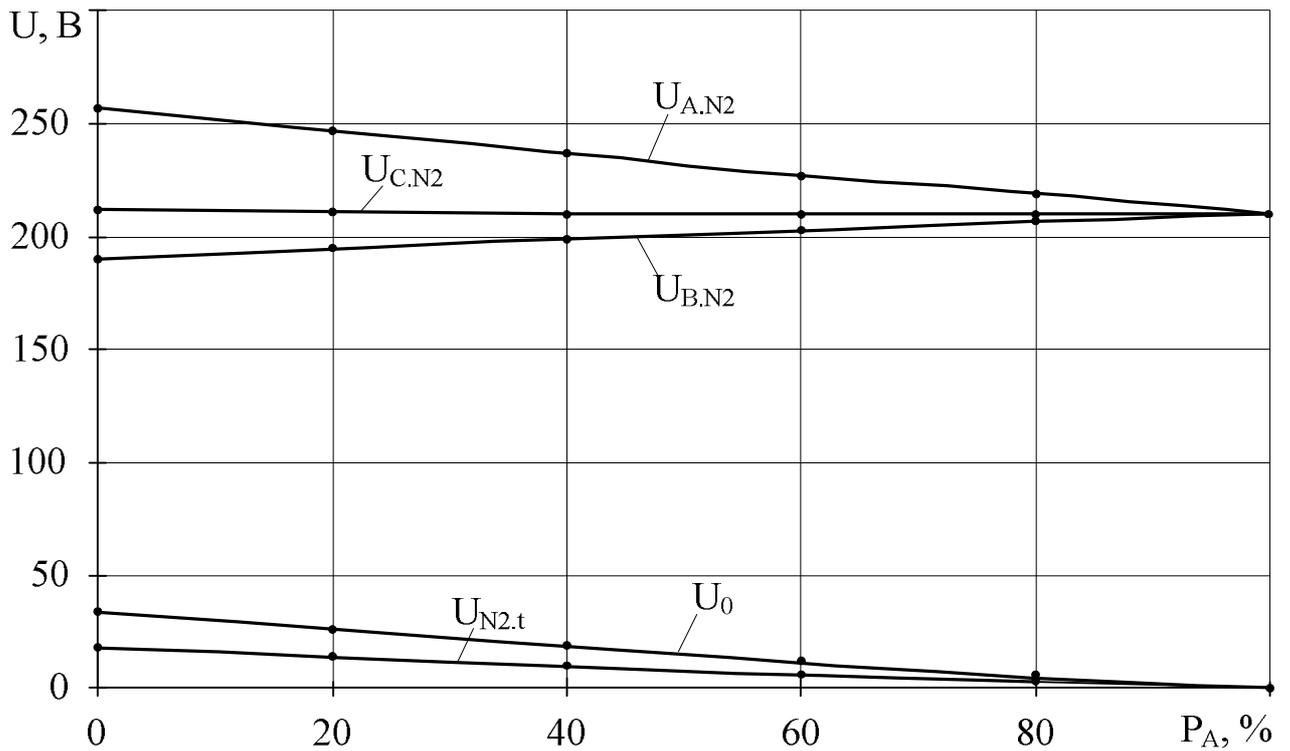


Рисунок 2.4 – Графические характеристики напряжений электрической сети в нормальном режиме работы при изменении нагрузки в фазе А,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

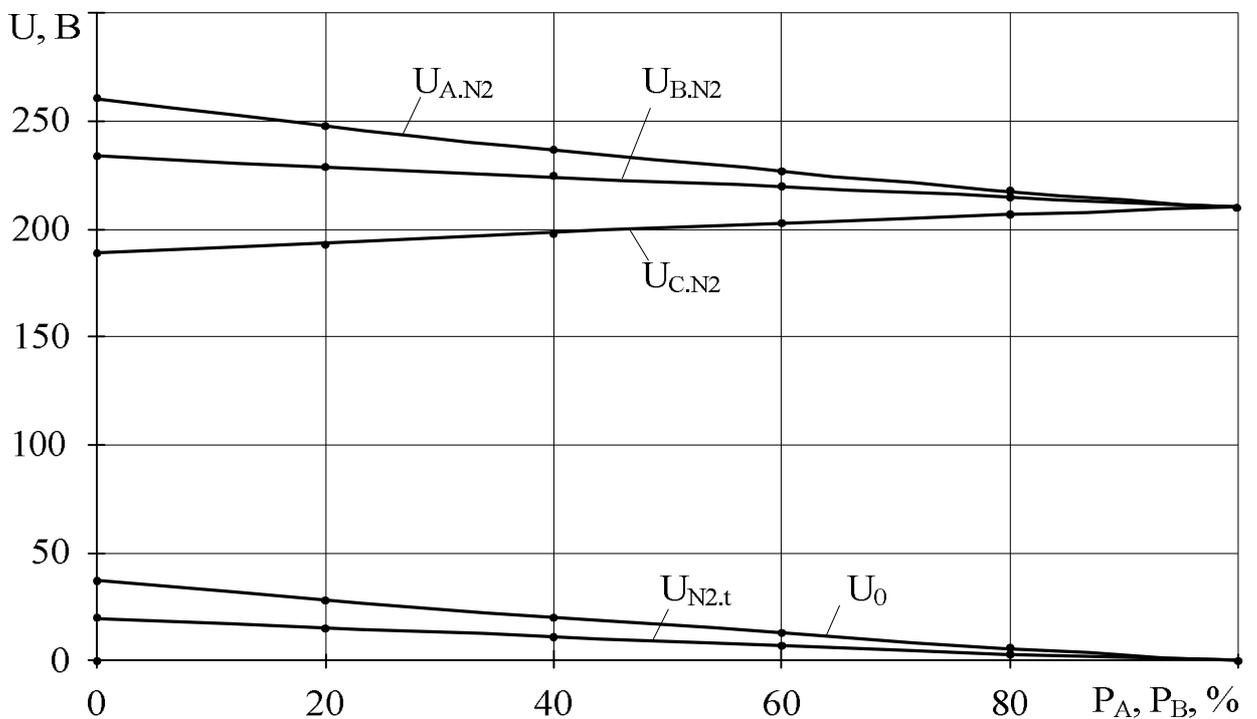


Рисунок 2.5 – Графические характеристики напряжений электрической сети в нормальном режиме работы при изменении нагрузки в фазах А и В,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

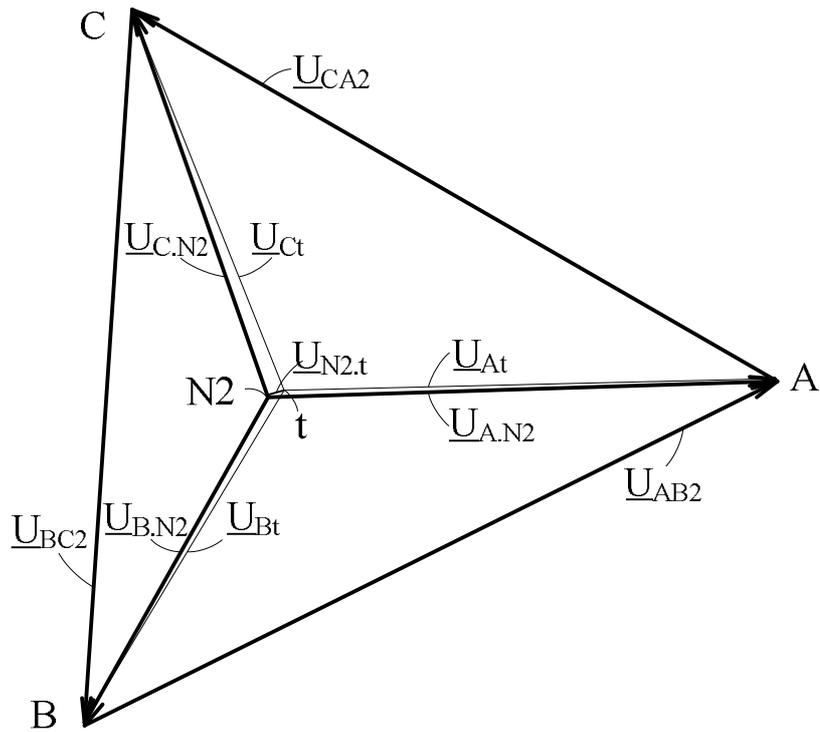


Рисунок 2.6 – Векторные диаграммы напряжений электрической сети в нормальном режиме работы при отсутствии нагрузки в фазе А,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

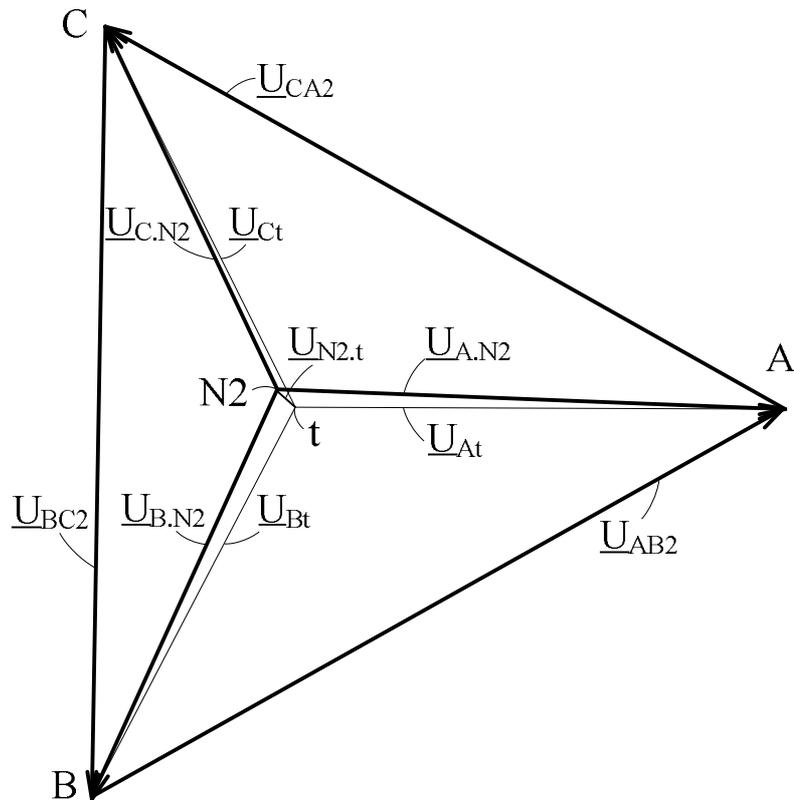


Рисунок 2.7 – Векторные диаграммы напряжений электрической сети в нормальном режиме работы при отсутствии нагрузки в фазах А и В,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

1.5. Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети достигает 35 В или 15,9 % фазного номинального значения.

1.6. Напряжение нулевого провода N относительно земли t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) достигает  $U_{N2,t} = 17,7$  В.

2. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки одновременно на двух фазах А и В от 100 % до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

2.1. Треугольник линейных напряжений  $U_{AB,2}$ ,  $U_{BC,2}$ ,  $U_{CA,2}$ , сначала незначительно «деформируется», а при максимальной несимметрии фазных нагрузок, когда отсутствует нагрузка на двух фазах полностью, – становится снова симметричным.

2.2. Напряжения на фазах А и В относительно нулевого провода возрастают соответственно до  $U_{A,N2} = 261,8$  В и  $U_{B,N2} = 237,5$  В, превышая номинальное значение на 19 и 8 %.

2.3. Напряжение на фазе С относительно нулевого провода (на нагруженной фазе) снижается до значения  $U_{C,N2} = 184,6$  В или на 16,1 %.

2.4. Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети достигает 37,5 В или 17 % фазного номинального значения.

2.5. Напряжение нулевого провода N относительно «земли» t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) достигает  $U_{N2,t} = 20$  В.

В ходе экспериментов выявлено, что при замене чисто активной на активно-индуктивную нагрузку значения рассматриваемых напряжений практически не меняются.

### **2.3.2 Исследования напряжений электрической сети при обрывах фазного провода**

Рассмотрим работу ВЛ-380 В при обрыве фазного провода. На рисунках 2.1 и 2.2 пунктирными линиями 1 и 2 обозначены два поперечных сечения ВЛ, между

которыми возникает обрыв фазного провода – ОФ. Исследуем следующие сочетания обрывов фазного провода и изменения фазной нагрузки при сопротивлении заземляющего устройства потребителя  $R_{3y.п} = \infty \text{ Ом}$ :

– при обрыве провода фазы А рассмотрим изменение фазной нагрузки на фазе В и постоянной нагрузке на фазе С – таблица 2.4;

– при обрыве провода фазы В рассмотрим изменение фазной нагрузки на фазе А и постоянной нагрузке на фазе С – таблица 2.5;

– при обрыве провода фазы С рассмотрим изменение фазной нагрузки сначала на одной фазе А, а потом одновременно на двух фазах А и В – таблица 2.6.

Такое исследование позволит рассмотреть влияние изменения нагрузки на опережающей или отстающей фазе по отношению к фазе, в которой возникает обрыв фазного провода. В первом случае фаза В с изменяющейся нагрузкой будет являться отстающей по отношению к фазе А с оборванным фазным проводом. Во втором случае фаза А с изменяющейся нагрузкой будет являться опережающей по отношению к фазе В с оборванным проводом. В третьем случае фаза А с изменяющейся нагрузкой будет являться отстающей по отношению к фазе С с оборванным проводом.

На рисунках 2.8 и 2.9 приведены графики изменения напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителя и сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{3y.п} = \infty \text{ Ом}$ .

На рисунках 2.10 и 2.11 показаны векторные диаграммы напряжений электрической сети при обрыве провода фазы С при отсутствии нагрузки соответственно на одной фазе А и на двух фазах А и В при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ).

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

Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$		Напряжения у потребителя, В/град							
В	С	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{0.2}$	$U_{N2.t}$
100	100	393,2	364,2	378,5	0	189,4	211,7	56,52	18,31
		26,57	-93,61	150,3		-119,9	109,7	168,1	-174
80	100	395,3	368,7	378,9	0	197,1	207,9	55,95	17,07
		27,06	-93,6	150,2		-118,7	110,2	172,3	176,8
60	100	397,6	373,5	379,4	0	205,2	203,6	55,5	16,42
		27,6	-93,55	150,2		-117,5	110,6	177	165,5
40	100	399,8	378,6	379,9	0	214	199	55,21	16,64
		28,19	-93,47	150,2		-116,1	111	-177,8	152,9
20	100	402,2	384,2	380,5	0	223,4	193,9	55,14	17,93
		28,84	-93,33	150,1		-114,6	111,4	-172,2	140,5
0,001	100	404,5	390,3	381,2	0	233,5	188,2	55,35	20,33
		29,56	-93,15	150,1		-113	111,8	-166	129,7

Таблица 2.5 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве провода фазы В,  $R_{3У.П} = \infty$  Ом

Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$		Напряжения у потребителя, В/град							
А	С	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{0.2}$	$U_{N2.t}$
100	100	378,5	393,2	364,2	211,7	0	189,4	56,5	18,31
		30,28	-93,43	146,4	-10,27		120,1	48,07	65,96
80	100	382,7	392,7	367,4	220,2	0	188,5	60,65	17,36
		30,09	-93,37	147	-9,1		118,7	45,8	76,64
60	100	387,4	392,2	370,7	229,4	0	187,8	65,31	16,91
		29,91	-93,32	147,6	-7,85		117,2	43,83	89,09
40	100	392,6	391,7	374,1	239,2	0	187,5	70,53	17,17
		29,76	-93,26	148,4	-6,48		115,6	42,18	102,8
20	100	398,2	391	377,6	249,7	0	187,6	76,36	18,28
		29,64	-93,2	149,2	-5		113,7	40,87	116,6
0,001	100	404,5	390,3	381,2	261	0	188,2	82,84	20,33
		29,56	-93,15	150,1	-3,38		111,8	39,89	129,7

Таблица 2.6 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве провода фазы С,  $R_{3У.П} = \infty$  Ом

Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$		Напряжения у потребителя, В/град							
А	В	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{0.2}$	$U_{N2.t}$
100	100	364,2	378,5	393,2	189,4	211,7	0	56,52	18,31
		26,39	-89,72	146,6	0,105	-130,3		-71,93	-54,04
80	100	368,7	378,9	395,3	197,1	207,9	0	55,95	17,07
		26,4	-89,76	147,1	1,165	-129,8		-67,65	-63,22
60	100	373,5	379,6	397,6	205,2	203,6	0	55,5	16,42
		26,45	-89,8	147,6	2,521	-129,4		-62,95	-74,48
40	100	378,6	379,9	399,8	214	199	0	55,21	16,64
		26,53	-89,85	148,2	3,885	-129		-57,79	-87,09
20	100	384,2	380,5	402,2	223,4	193,9	0	55,14	17,93
		26,67	-89,89	148,8	5,37	-128,6		-52,15	-99,53
0,001	100	390,3	381,2	404,5	233,5	188,2	0	55,35	20,33
		26,85	-89,93	149,6	6,991	-128,2		-46,01	-110,3
100	100	364,2	378,5	393,2	189,4	211,7	0	56,52	18,31
		26,39	-89,72	146,6	0,105	-130,3		-71,93	-54,04
80	80	371,7	383,1	395	196,1	216,3	0	59,95	15,54
		26,97	-89,95	147,1	-0,083	-128,7		-70,18	-52,29
60	60	379,5	388	397	203,7	220,9	0	63,75	12,39
		27,58	-90,14	147,7	-0,266	-126,9		-68,19	-50,3
40	40	387,5	393,2	399,2	212,3	225,4	0	67,97	8,81
		28,21	-90,29	148,2	-0,408	-125		-65,94	-48,05
20	20	395,8	398,7	401,7	222,2	229,6	0	72,66	4,708
		28,87	-90,4	148,9	-0,4811	-122,8		-63,38	-45,49
0,001	0,001	404,5	404,5	404,5	233,5	233,5	0	77,84	0
		29,56	-90,44	149,6	-0,4389	-120,4		-60,44	-42,55

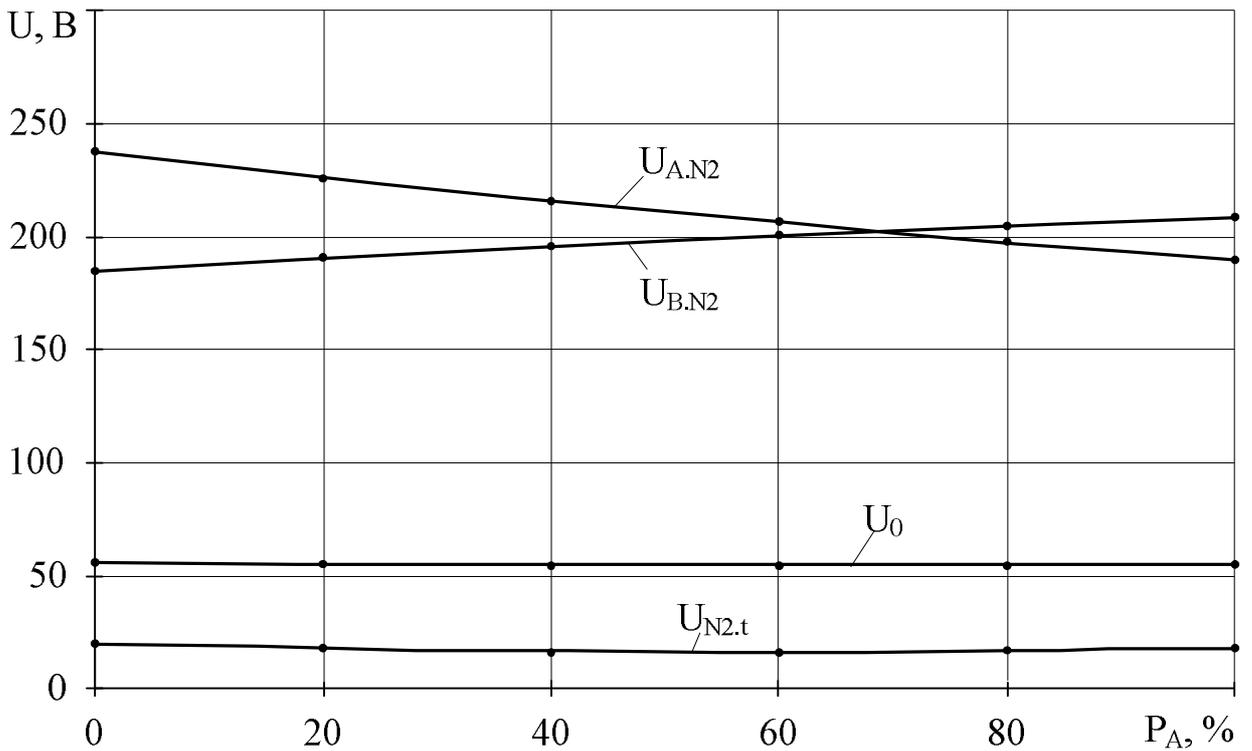


Рисунок 2.8 – Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным проводом фазы С при изменении нагрузки в фазе А,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

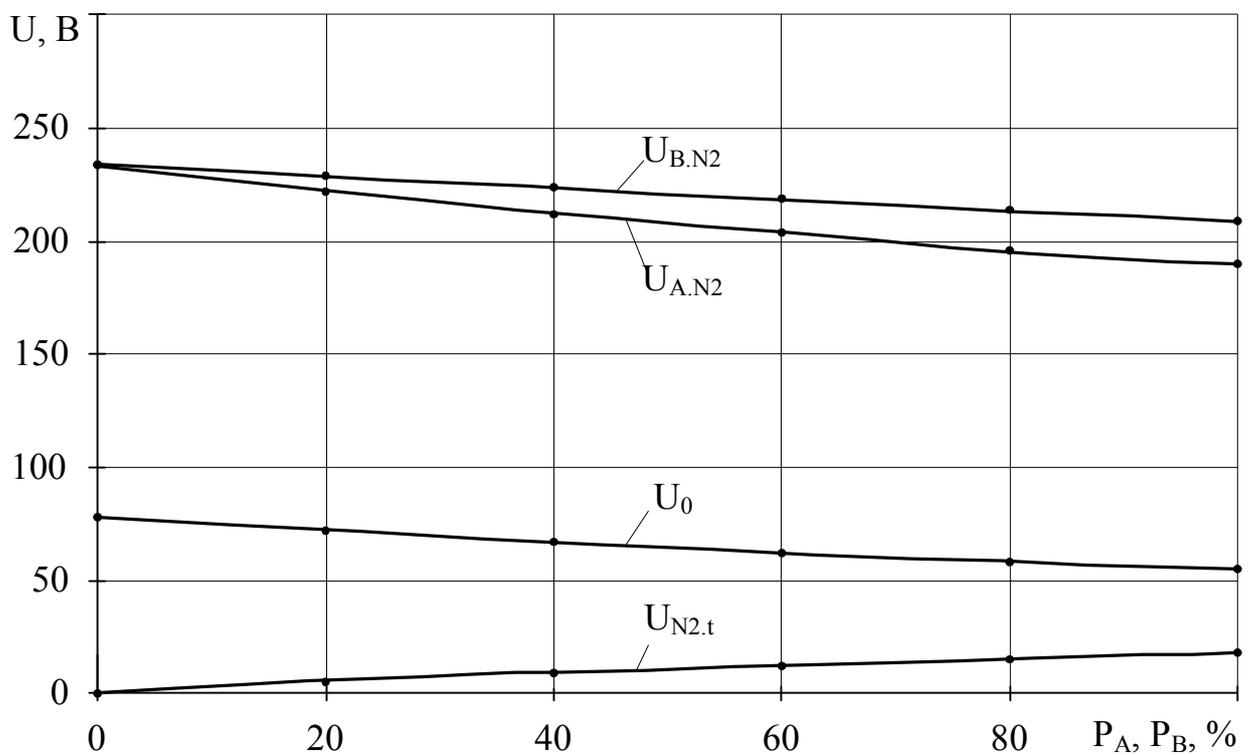


Рисунок 2.9 – Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным проводом фазы С при изменении нагрузки в фазах А и В,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

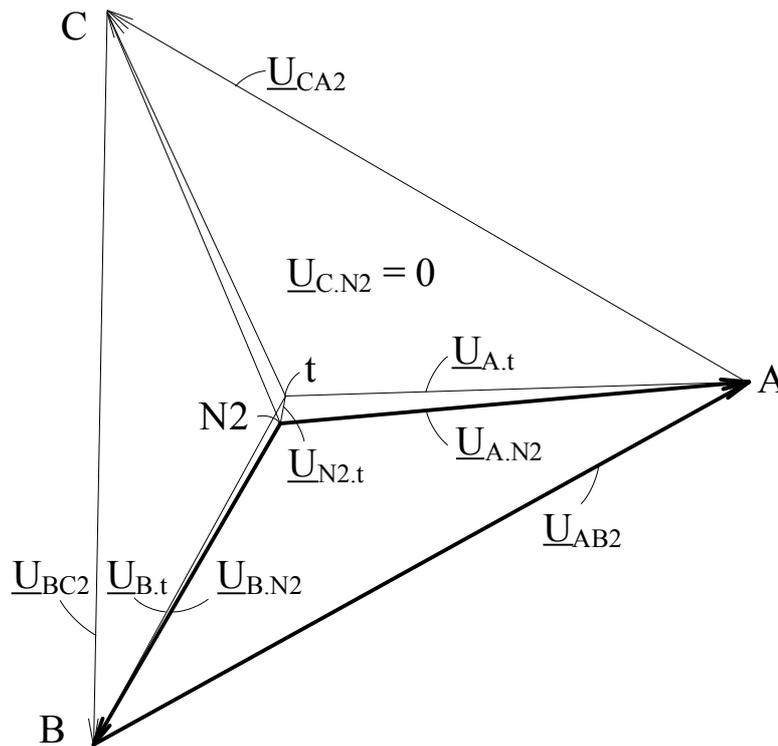


Рисунок 2.10 – Векторная диаграмма напряжений электрической сети при обрыве провода фазы C, отсутствует нагрузка в фазе A,  $R_{3y.\Pi} = \infty \text{ Ом}$

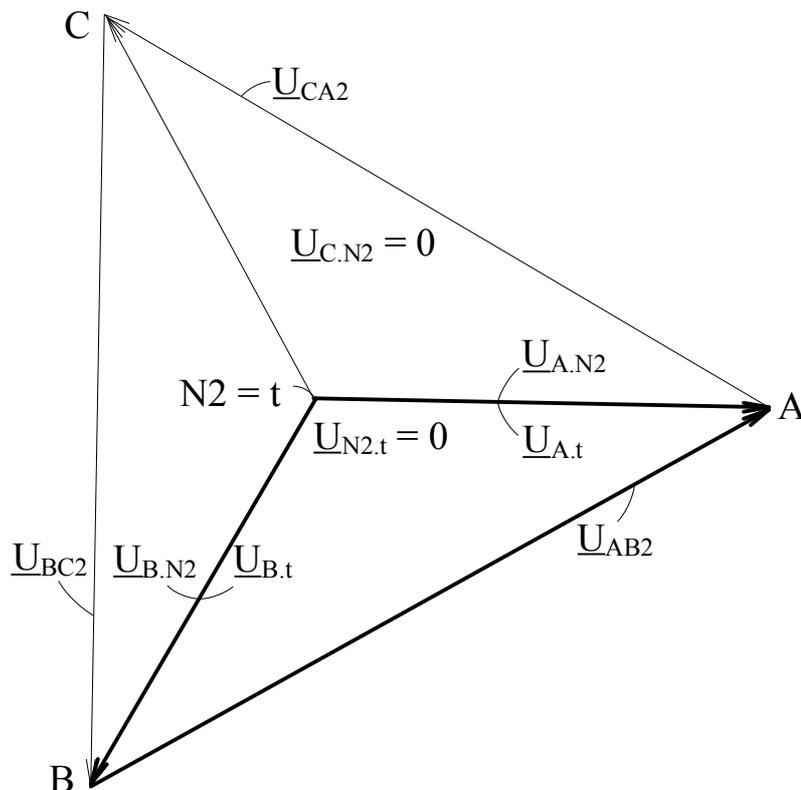


Рисунок 2.11 – Векторная диаграмма напряжений электрической сети при обрыве провода фазы C, отсутствует нагрузка в фазах A и B,  $R_{3y.\Pi} = \infty \text{ Ом}$

По результатам анализа этих данных можно сделать следующие выводы:

1. На повреждённой фазе на оборванном проводе независимо от того, какая из фаз повреждена со стороны источника питания (поперечное сечение 1) сохраняется фазное напряжение, практически равное напряжению, существовавшему до момента обрыва провода. ***Именно, оборванный фазный провод со стороны питания представляет особую опасность для людей и животных, которые могут прикоснуться к нему.***

2. В той же ситуации, но на оборванном проводе со стороны потребителя (поперечное сечение 2) напряжение относительно нулевого провода становится равным нулю. Однако, напряжение на этом оборванном проводе относительно земли  $t$  равно напряжению нейтрали потребителя относительно земли  $t - U_{N2,t}$ , что тоже может представлять некоторую опасность для людей, т.к. это напряжение может достигать 17,5 В [18, 114, 115].

3. Поскольку при подключении однофазных электроприёмников по схеме «фаза – нуль» и обрыве фазного провода исчезает соответствующая фазная нагрузка, то исследовании влияния несимметрии нагрузок на напряжения сети проводилось при изменении нагрузки в одной из фаз, остававшейся целой. В тоже время рассмотрен и случай одновременного изменения нагрузок в двух фазах.

4. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки только на одной фазе от 100 % до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

4.1. Изменяется («деформируется») треугольник линейных напряжений  $U_{AB,2}$ ,  $U_{BC,2}$ ,  $U_{CA,2}$ , причём разница между ними достигает 10-ти %.

4.2. При изменении нагрузки в отстающей (по отношению к повреждённой фазе) фазе (например при оборванном проводе фазы А меняется нагрузка в фазе В (таблица 2.4) или соответственно в фазах С и А (таблицы 2.5 и 2.6) напряжение на оборванном проводе относительно нулевого провода со стороны источника питания возрастает со 190,3 до 237,5 В, а на здоровой фазе с неизменной 100 %-й нагрузкой соответственно уменьшается с 209,3 до 185,2 В.

4.3. При изменении нагрузки на опережающей фазе, например на фазе А при оборванном проводе фазы В (таблица 2.5), напряжение на фазе А относительно

нулевого провода возрастает с 211,7 до 261 В, а на здоровой фазе с неизменной 100 %-й нагрузкой практически остаётся неизменным, находясь на уровне около 190 В.

4.4. Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети при изменении нагрузки в опережающей фазе находится приблизительно на одном уровне примерно равном 55,6–55,9 В. А при изменении нагрузки на отстающей фазе возрастает со значения 56,6 до 82,8 В. Следовательно, при обрыве фазного провода напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  меняется в пределах 25,2–37,6 % фазного номинального значения.

4.5. Напряжение нулевого провода N2 относительно «земли»  $t$  при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) достигает  $U_{N2,t} = 20,3$  В.

5. Изменение нагрузки одновременно на двух фазах А и В от 100 % до 0 % в проводилось для случая обрыва провода фазы С:

5.1. Треугольник линейных напряжений  $U_{AB,2}$ ,  $U_{BC,2}$ ,  $U_{CA,2}$  сначала незначительно «деформируется», а при максимальной несимметрии фазных нагрузок, когда отсутствует нагрузка на двух фазах полностью, – становится снова симметричным.

5.2. С уменьшением фазных нагрузок напряжения на фазах А и В относительно нулевого провода возрастают соответственно с 190 и 212 В до 233,5 В – фактически до холостого режима работы ВЛ-380 В.

5.3. Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети возрастает со значения 56,9 до 77,8 В и достигает 35,4 % фазного номинального значения.

5.4. Напряжение нулевого провода N2 относительно земли  $t$  при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) со значения  $U_{N2,t} = 18,3$  В снижается до нуля.

Как видно из результатов измерений при обрыве фазного провода воздушной линии напряжения 380 В на оборванном фазном проводе относительно нулевого провода со стороны потребителя напряжение практически снижается до нуля.

Данный уровень напряжения не зависит от места обрыва фазного провода (в начале или конце ВЛ, или перед потребителем). Напряжение на оборванном фазном проводе зависит от распределения нагрузки по фазам.

*Снижение напряжения на оборванном фазном проводе у потребителя практически до нуля является чётким признаком и может служить информацией для выявления данного вида несимметричного режима работы воздушной линии.*

### 2.3.3 Исследования напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода

Рассмотрим работу ВЛ-380 В при обрыве нулевого фазного провода. На рисунках 2.1 и 2.2 пунктирными линиями 1 и 2 обозначены два поперечных сечения ВЛ, между которыми возникает обрыв нулевого провода – ОН. Все повторные заземлители ВЛ находятся до места обрыва нулевого провода.

При моделировании производилось изменение мощности однофазных потребителей. Сначала изменялась активная мощность потребителя присоединенного на фазу А от 100 % до 0 %  $P_{н.макс}$  с шагом в 20 %. На втором этапе аналогичным образом одновременно изменялась активная мощность двух потребителей, присоединенных к фазам А и В. Заземляющее устройство потребителя отключено, т.е.  $R_{з\text{у.п}} = \infty \text{ Ом}$ .

Результаты исследований параметров электрической сети при обрыве нулевого провода, полученных при компьютерном моделировании приведены в таблице 2.7.

По данным полученных исследований построены графики изменения напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителей и при  $R_{з\text{у.п}} = \infty \text{ Ом}$  и приведены на рисунках 2.12 и 2.13.

При анализе этих данных можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки только на одной фазе А от 100 % до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

Таблица 2.7 – Результаты исследований параметров электрической сети при обрыве нулевого провода,  $R_{3У.П} = \infty$  Ом

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя, В/град							
	А	В	С	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{0.2}$	$U_{N2.t}$
1	100	100	100	364,6	364,6	364,6	211	210,5	210,5	0	0
				26,33	-93,7	146,3	-3,67	-124	116,3	0	0
2	80	100	100	369,7	364,6	367,5	229	204,6	203,4	15,26	15,26
				26,28	-93,7	147	-3,27	-120	113,1	-3,265	176,7
3	60	100	100	375,8	364,6	370,9	251	198,3	196,1	33,42	33,42
				26,25	-93,7	147,8	-2,78	-116	108,9	-2,778	177,2
4	40	100	100	383,2	364,6	374,9	277	191,9	189,2	55,4	55,4
				26,21	-93,7	148,7	-2,19	-110	103,3	-2,189	177,8
5	20	100	100	392,3	364,6	379,9	310	186,1	183,7	82,53	82,53
				26,21	-93,7	149,9	-1,46	-103	96,02	-1,462	178,5
6	0	100	100	403,9	364,6	386,2	351	182,3	182,3	116,9	116,9
				26,25	-93,7	151,3	-0,54	-93,7	86,33	-0,5411	179,5
7	100	80	80	367,6	372,1	369,6	195,8	222	223,3	16,32	16,32
				146,9	26,9	-93,7	116,5	-6,55	-120	-183,4	-3,5
8	100	60	60	371,7	379,8	375,4	175,4	238	241	38,99	38,99
				147,6	27,5	-93,5	116,8	-10,3	-115	-183,1	-3,2
9	100	40	40	377,5	387,9	382,3	145,2	264	267,5	72,6	72,6
				148,2	28,13	-93,2	117,3	-15,4	-109	-182,7	-2,7
10	100	20	20	386,9	396,2	391,3	95,68	309	312,5	127,6	127,6
				148,8	28,78	-92,4	118	-22	-101	-181,7	-2,0
11	100	0	0	404,8	404,8	404,8	0	405	404,8	233,7	233,7
				149,5	29,46	-90,5	-	-30,5	-90,5	-180,5	-0,5

1.1. Изменяется («деформируется») треугольник линейных напряжений  $U_{AB.2}$ ,  $U_{BC.2}$ ,  $U_{CA.2}$ , причём разница между ними достигает 10-ти %.

1.2. Напряжение на фазе А относительно нулевого провода возрастает со значения  $U_{A.N2} = 210,5$  В до 351 В (при  $R_{3У.П} = \infty$  Ом.), достигая 150 % и более номинального фазного значения. Увеличение напряжения  $U_{A.N2}$  более 150 % объясняется «деформацией» треугольника линейных напряжений из-за снижения нагрузки на фазе до 0 %.

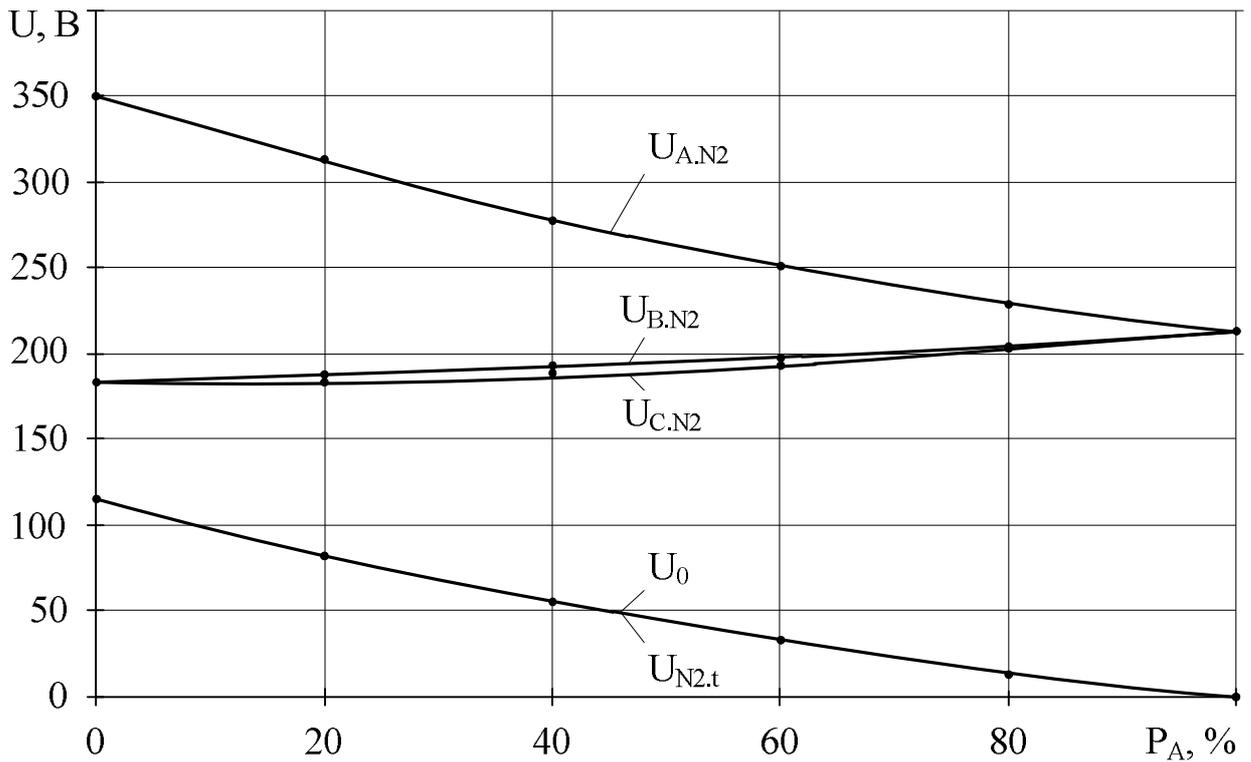


Рисунок 2.12 – Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным нулевым проводом при изменении нагрузки в фазе А,  $R_{3y.л} = \infty \text{ Ом}$

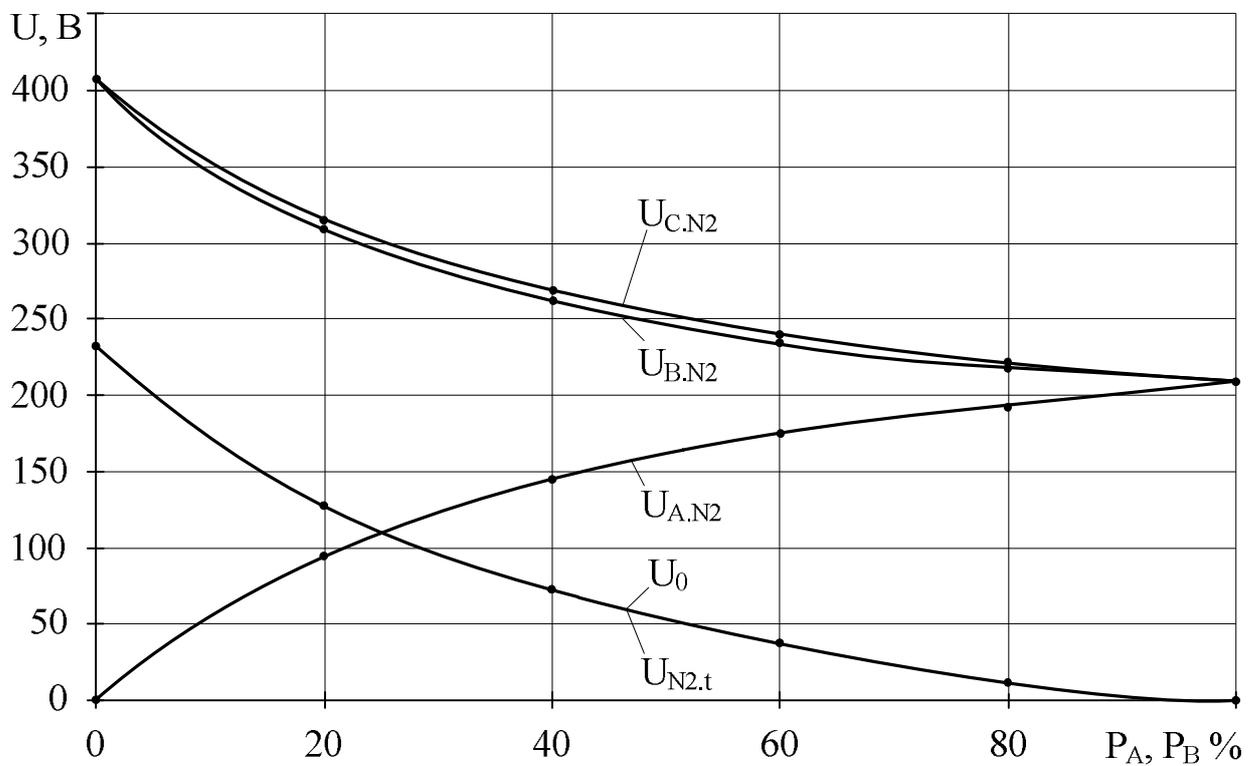


Рисунок 2.13 – Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным нулевым проводом при изменении нагрузки в фазах В и С,  $R_{3y.л} = \infty \text{ Ом}$

1.3. Напряжения на фазах В и С относительно нулевого провода уменьшается с фазных значений до половины линейного напряжения  $U_{BC2} = 364,6$  В, составляя соответственно  $U_{B.N2} = 182,3$  В и  $U_{C.N2} = 182,3$  В или 86,7 % номинального фазного напряжения.

1.4. Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети возрастает с нуля до 116,9 В, составляя 50 % фазного номинального значения – превышение более 50 % связано с «деформацией» треугольника линейных напряжений при снижении нагрузки на фазе А.

1.5. Напряжение нулевого провода N2 относительно земли t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) достигает также значения  $U_{N2,t} = 116,9$  В, равняясь напряжению нулевой последовательности  $U_0$ .

2. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки одновременно на двух фазах В и С от 100 % до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

2.1. Треугольник линейных напряжений  $U_{AB,2}$ ,  $U_{BC,2}$ ,  $U_{CA,2}$ , сначала незначительно «деформируется», а при максимальной несимметрии фазных нагрузок, когда отсутствует нагрузка на двух фазах полностью, – становится снова симметричным.

2.2. Напряжения на фазах В и С относительно нулевого провода возрастают с фазного до линейного значения, соответственно составляя до  $U_{B.N2} = 405$  В и  $U_{C.N2} = 404,8$  В, превышая номинальное значение на 173,2 %.

2.3. Напряжение на фазе А относительно нулевого провода (на нагруженной фазе) снижается с фазного значения  $U_{A.N2} = 211$  В до нуля – при подключенной однофазной нагрузке только на фазе А, составляющей 100 % от исходной номинальной.

2.4. Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети возрастает с нуля до 233,7 В, составляя 100 % фазного номинального значения (фазное напряжение электрической сети на холостом ходу – т.е. при отсутствии нагрузок потребителей) – превышение более 100 % связано с «деформацией» треугольника линейных

напряжений при снижении нагрузки на фазе А.

2.5. Напряжение нулевого провода N2 относительно земли t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) достигает также значения  $U_{N2.t} = 233,7$  В, равняясь напряжению нулевой последовательности  $U_0$ .

На рисунках 2.14 и 2.15 показаны векторные диаграммы напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода при отсутствии нагрузки соответственно на одной фазе А и на двух фазах А и В при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ).

На рисунке 2.14 видно, что при отсутствии нагрузки только на фазе А и отсутствии заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) потенциал нейтрали N2 трёхфазной нагрузки потребителя перемещается из центра t треугольника линейных напряжений (потенциал земли при симметричной нагрузке) на середину вектора линейного напряжения  $U_{BC.2}$ . При этом напряжение на фазе А возрастёт до значения  $U_{A.N2} = 1,5 \cdot U_{\Phi}$ , а два других напряжения снижаются до  $U_{B.N2} = U_{C.N2} = 0,866 \cdot U_{\Phi}$ .

На рисунке 2.15 видно, что при отсутствии нагрузки на фазах В, С и заземляющего устройства у потребителя ( $R_{3y.п} = \infty$ ) потенциал нейтрали N2 трёхфазной нагрузки перемещается из центра t треугольника линейных напряжений (потенциал земли при симметричной нагрузке) в вершину треугольника в точку А. При этом напряжение на фазе А без нагрузки становится равным нулю  $U_{A.N2} = 0$ , а два других напряжения на фазах В и С становятся равным линейному напряжению  $U_{B.N2} = U_{C.N2} = 1,732 \cdot U_{\Phi} = U_{Л}$ .

***Увеличение фазных напряжений отрицательно влияет на работу питающихся от этих фаз электроприемников, уменьшает срок службы и может привести к их выходу из строя.***

***Повышение напряжения нейтрали потребителя в первом случае до половины фазного напряжения, а во втором случае – до фазного значения, может привести к поражению людей и животных, которые могут коснуться оборванного нулевого провода со стороны потребителя, т.е. отрицательно влияют на условия электробезопасности.***

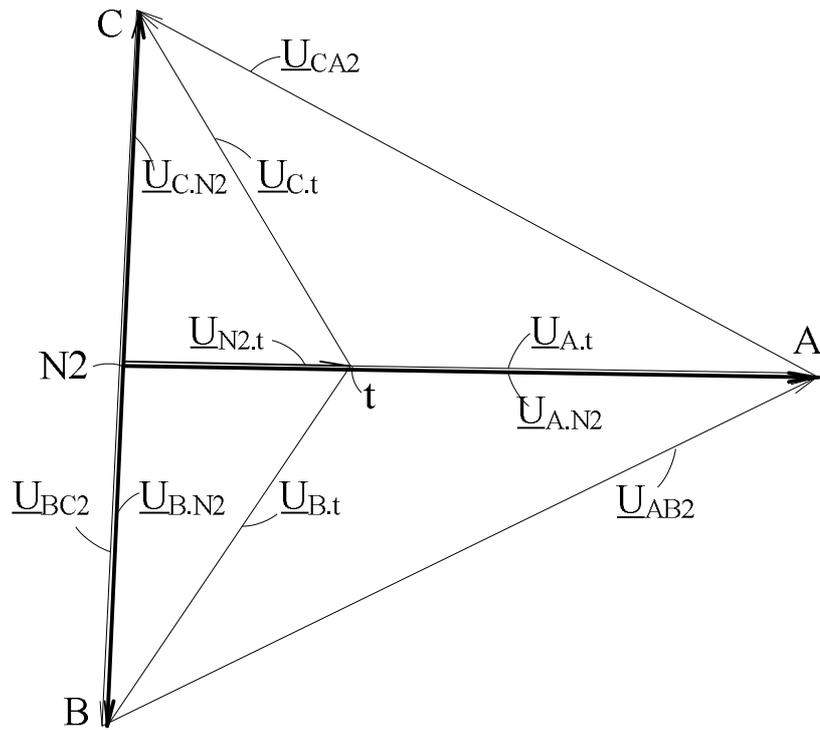


Рисунок 2.14 – Векторная диаграмма напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода (отсутствует нагрузка в фазе А,  $R_{3y.\Pi} = \infty \text{ Ом}$ )

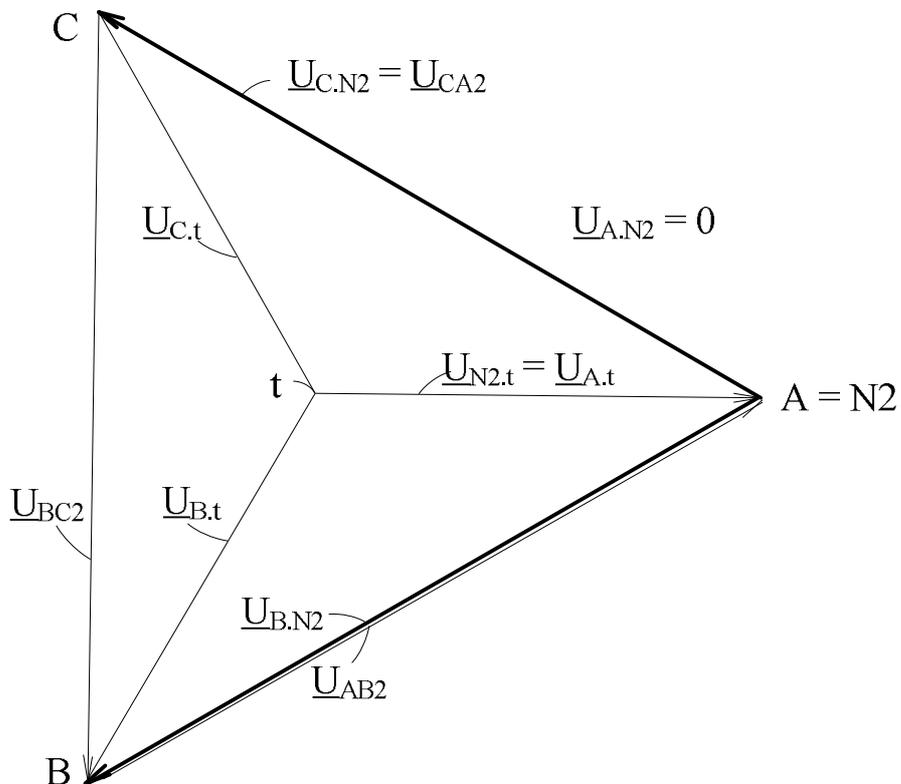


Рисунок 2.15 – Векторная диаграмма напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода (отсутствует нагрузка в фазах В и С,  $R_{3y.\Pi} = \infty \text{ Ом}$ )

На рисунке 2.16 приведены кривые изменения напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$  и напряжения нулевого провода относительно земли  $U_{N2,t}$  в зависимости от величины фазной нагрузки (данные получены в результате выборки из таблиц 2.3–2.7), измеренные для поперечного сечения 2, для различных режимов работы и при отсутствии заземляющего устройства, т.е.  $R_{3y,II} = \infty$ .

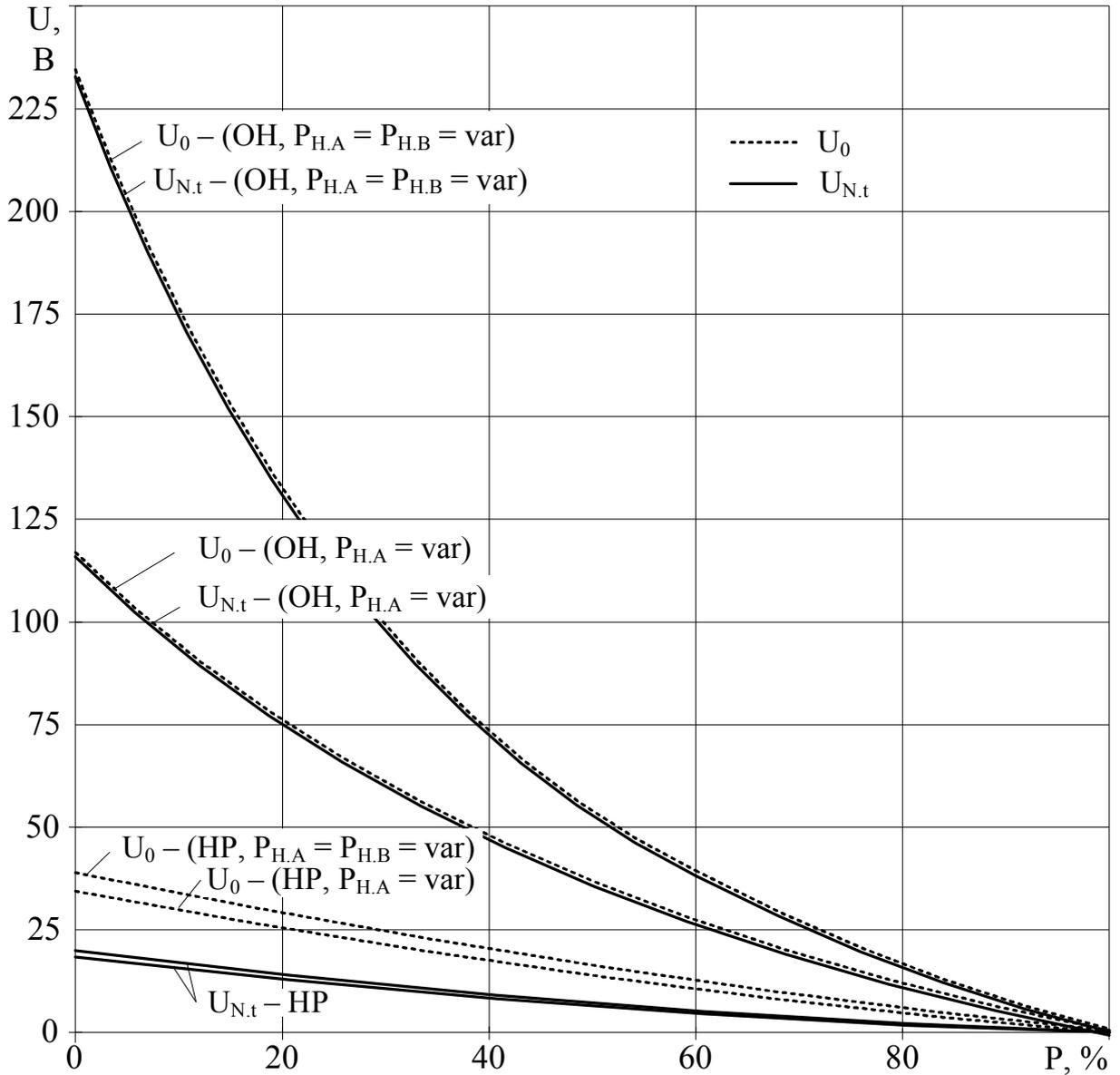


Рисунок 2.16 – Изменение напряжения нулевой последовательности и напряжения нулевого провода относительно земли при сопротивлении заземляющего устройства  $R_{3y,II} = \infty$  в зависимости от величины фазной нагрузки

### 2.3.4 Исследования влияния сопротивления заземляющего устройства потребителя на напряжения электрической сети

На напряжения электрической сети на вводе потребителя (после поперечного сечения 2 воздушной линии) существенное влияние оказывает сопротивление заземляющего устройства, как при нормальном режиме работы сети, так и особенно при обрыве нулевого провода.

Результаты компьютерного моделирования нормального режима работы сети при изменении фазных нагрузок в одной или одновременно в двух фазах при различных значениях сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{3y.n}$  (0,5, 1, 5, 30,  $\infty$  Ом) представлены в таблице 2.8.

По полученным результатам построены графики изменения напряжения  $U_{N2.t}$  при изменении нагрузки в одной и двух фазах для нормального режима работы электрической сети при различных сопротивлениях заземляющего устройства у потребителя  $R_{3y.n}$  – соответственно рисунки 2.17 и 2.18.

Из анализа графиков видно, что напряжение  $U_{N2.t}$  между нейтральной точкой N2 потребителей, соединенных в звезду, и землей t практически линейно зависит от несимметрии нагрузки в фазах. С увеличением сопротивления  $R_{3y.n}$  растёт и напряжение  $U_{N2.t}$ , достигая максимального значения при отсутствии указанного сопротивления. При максимальной несимметрии электрических нагрузок по фазам напряжение  $U_{N2.t}$  соответственно достигает значений 18,3 и 20,3 В.

Увеличение напряжения  $U_{N2.t}$  может ухудшить условия электробезопасности. Поэтому, с одной стороны, нужно по возможности снижать сопротивление повторного заземлителя у потребителя, но, с другой стороны, если у потребителя устанавливается устройство защитного отключения, то заземление нейтральной точки потребителя исключается принципиально.

Таблица 2.8 – Влияние сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{ЗУ.П}$  на напряжения электрической сети при нормальном режиме её работы

Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Сопротивление заземляющего устройства потребителя, $R_{ЗУ.П}$ , Ом									
			0,5					1				
А	В	С	$U_{A.N2},$ В	$U_{B.N2},$ В	$U_{C.N2},$ В	$U_{0,2},$ В	$U_{N2,t},$ В	$U_{A.N2},$ В	$U_{B.N2},$ В	$U_{C.N2},$ В	$U_{0,2},$ В	$U_{N2,t},$ В
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	100	100	218,4	207	210	5,7	0,416	218,4	206,9	210	5,7	0,734
			-2,56	-123	115,3	22,26		-2,56	-123	115,3	22,22	
60	100	100	227	203,3	209,9	11,85	0,865	227	203,3	209,9	11,88	1,526
			-1,4	-122,3	114,1	23,4		-1,4	-122,3	114,1	23,35	
40	100	100	236,2	199,3	210,2	18,51	1,351	236,3	199,2	210,1	18,55	2,383
			-0,2	-121,6	112,8	24,6		-0,2	-121,6	112,8	24,58	
20	100	100	246,1	194,8	210,8	25,71	1,876	246,2	194,8	210,7	25,77	3,31
			1,118	-120,8	111,4	25,94		1,121	-120,8	111,4	25,9	
0,1	99,9	99,9	256,7	189,9	211,8	33,46	2,442	256,8	189,9	211,8	33,54	4,308
			2,552	-120	109,9	27,38		2,556	-120	109,9	27,35	
0,001	100	100	256,8	189,9	211,8	33,53	2,447	256,8	189,8	211,8	33,61	4,317
			2,56	-120	109,9	27,38		2,56	-120	109,9	27,35	
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	80	100	218,1	215	206,6	5,8	0,423	218,1	215	206,6	5,8	0,747
			-3,65	-121,9	115,9	-37,26		-3,65	-121,9	115,9	-37,3	
60	60	100	226,8	219,7	202,5	12,3	0,897	226,9	219,7	202,5	12,33	1,583
			-3,66	-120	115,2	-35,55		-3,66	-120	115,2	-35,6	
40	40	100	236,6	224,4	198,2	19,59	1,43	236,7	224,4	198,2	19,64	2,52
			-3,62	-118	114,4	-33,6		-3,63	-118	114,4	-33,66	
20	20	100	247,7	228,9	193,7	27,81	2,029	247,7	229	193,6	27,88	3,58
			-3,5	-115,7	113,3	-31,44		-3,5	-115,7	113,3	-31,48	
0,1	0,1	99,9	260,2	233,3	189	37,02	2,7	260,2	233,3	188,9	37,12	4,768
			-3,27	-113,2	111,9	-28,97		-3,28	-113,2	111,9	-29	
0,001	0,001	100	260,2	233,3	189	37,1	-3,28	260,3	233,3	188,9	37,2	4,778
			-3,27	-113,2	111,9	-28,97		-3,28	-113,2	111,9	-29	

Продолжение таблицы 2.8

Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Сопrotивление заземляющего устройства потребителя, $R_{3y.п.}$ , Ом									
			5					30				
A	B	C	$U_{A.N2,}$ В	$U_{B.N2,}$ В	$U_{C.N2,}$ В	$U_{0.2,}$ В	$U_{N2.t,}$ В	$U_{A.N2,}$ В	$U_{B.N2,}$ В	$U_{C.N2,}$ В	$U_{0.2,}$ В	$U_{N2.t,}$ В
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	100	100	218,4	206,9	210	5,76	1,887	218,5	206,9	210	5,79	2,805
			-2,56	-123	115,3	22,08		-2,56	-122,9	115,3	21,97	
60	100	100	227,1	203,2	209,9	11,96	3,925	227,2	203,2	209,9	12,05	5,835
			-1,4	-122,3	114,1	23,2		-1,4	-122,2	114	23,11	
40	100	100	236,4	199,1	210,1	18,7	6,129	236,6	199,1	210,1	18,81	9,114
			-0,2	-121,5	112,7	24,44		-0,19	-121,5	112,7	24,34	
20	100	100	246,2	194,6	210,7	25,98	8,517	246,6	194,5	210,7	26,15	12,67
			1,13	-120,8	111,3	25,77		1,14	-120,7	111,3	25,67	
0,1	99,9	99,9	257,1	189,7	211,8	33,83	11,09	257,3	189,5	211,7	34,05	16,5
			2,57	-120	109,8	27,22		2,58	-119,9	109,8	27,13	
0,001	100	100	257,2	189,6	211,8	33,89	11,11	257,4	189,5	211,7	34,12	16,53
			2,58	-120	109,8	27,22		2,59	-119,9	109,8	27,12	
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	80	100	218,1	215	206,5	5,86	1,921	218,2	215	206,5	5,897	2,856
			-3,66	-121,9	115,9	-37,4		-3,67	-121,9	115,9	-37,5	
60	60	100	226,9	219,7	202,4	12,43	4,073	227	219,7	202,3	12,51	6,058
			-3,68	-120	115,2	-35,7		-3,7	-120	115,2	-35,8	
40	40	100	236,8	224,4	198	19,81	6,49	236,9	224,5	197,9	19,94	9,66
			-3,66	-117,9	114,4	-33,78		-3,68	-117,9	114,4	-33,88	
20	20	100	248	229	193,4	28,14	9,22	248,1	229,1	193,2	28,34	13,73
			-3,55	-115,6	113,3	-31,6		-3,58	-115,6	113,3	-31,67	
0,1	0,1	99,9	260,6	233,4	188,6	37,49	12,29	260,8	233,5	188,4	37,78	18,3
			-3,33	-113,1	111,8	-29,1		-3,36	-113,1	111,8	-29,17	
0,001	0,001	100	260,6	233,4	188,6	37,57	12,31	260,9	233,5	188,3	37,86	18,34
			-3,33	-113,1	111,8	-29,09		-3,37	-113	111,8	-29,17	

Окончание таблицы 2.8

Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$		Сопротивление заземляющего устройства потребителя, $R_{ЗУ.П}$ , Ом					
		$\infty$					
A	B	C	$U_{A.N2},$ В	$U_{B.N2},$ В	$U_{C.N2},$ В	$U_{0.2},$ В	$U_{N2.t},$ В
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4		
80	100	100	218,5	206,9	210	5,8	3,107
			-2,56	-122,9	115,3	21,94	
60	100	100	227,2	203,2	209,9	12,07	6,463
			-1,4	-122,2	114	23,08	
40	100	100	236,6	199	210,1	18,85	10,09
			-0,19	-121,5	112,7	24,31	
20	100	100	246,7	194,5	210,7	26,21	14,03
			1,14	-120,7	111,3	25,64	
0,1	99,9	99,9	257,4	189,5	211,7	34,13	18,27
			2,58	-119,9	109,7	27,09	
0,001	100	100	257,5	189,4	211,7	34,19	18,31
			2,59	-119,9	109,7	27,09	
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4		
80	80	100	218,2	215	206,5	5,9	3,163
			-3,67	-121,9	115,9	-37,57	
60	60	100	227	219,8	202,3	12,53	6,71
			-3,7	-120	115,2	-35,85	
40	40	100	236,9	224,5	197,9	19,99	10,7
			-3,69	-117,9	114,4	-33,91	
20	20	100	248,2	229,1	193,1	28,41	15,21
			-3,6	-115,6	113,3	-31,7	
0,1	0,1	99,9	260,9	233,5	188,3	37,88	20,28
			-3,38	-113	111,8	-29,2	
0,001	0,001	100	261	233,5	188,2	37,96	20,32
			-3,38	-113	111,8	-29,19	

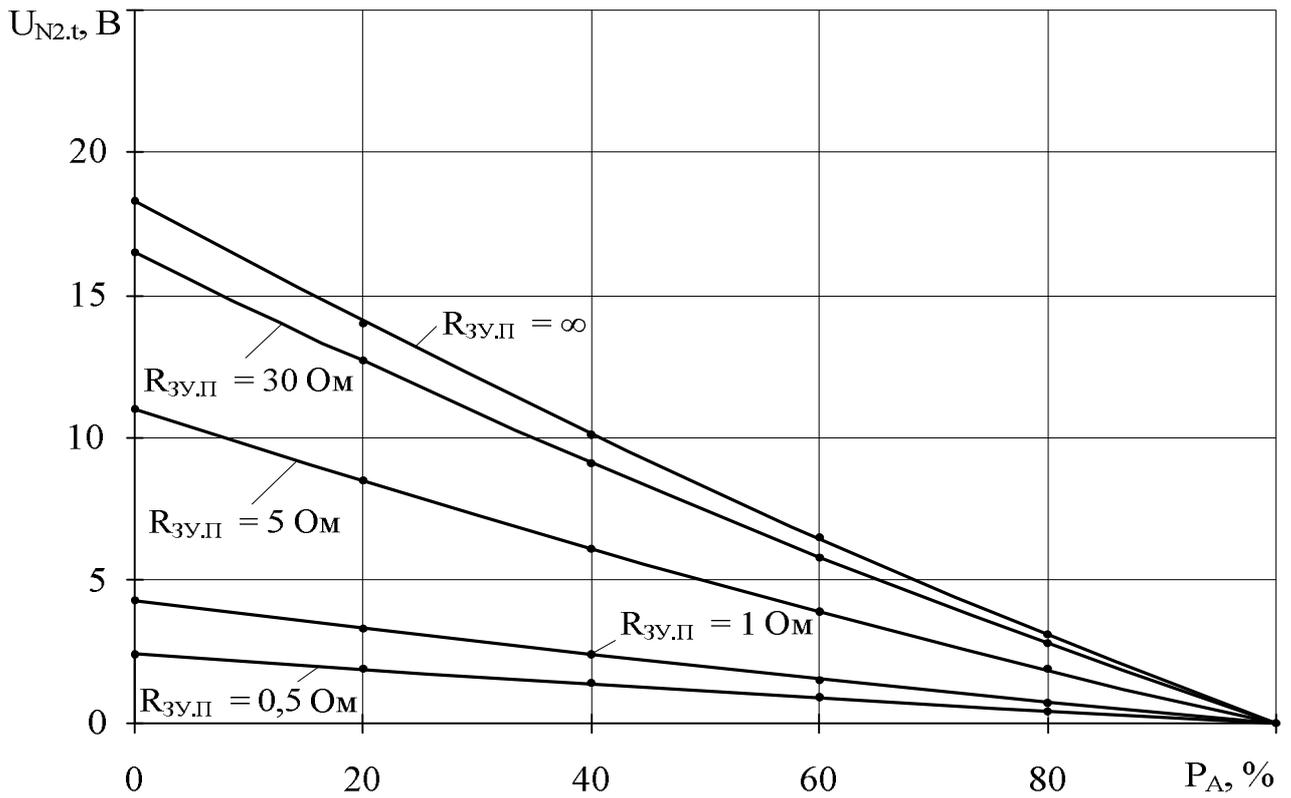


Рисунок 2.17 – График напряжения  $U_{N2,t} = f(P_{H,A})$  при нормальном режиме работы электрической сети при различных значениях сопротивления  $R_{3y, \Pi}$

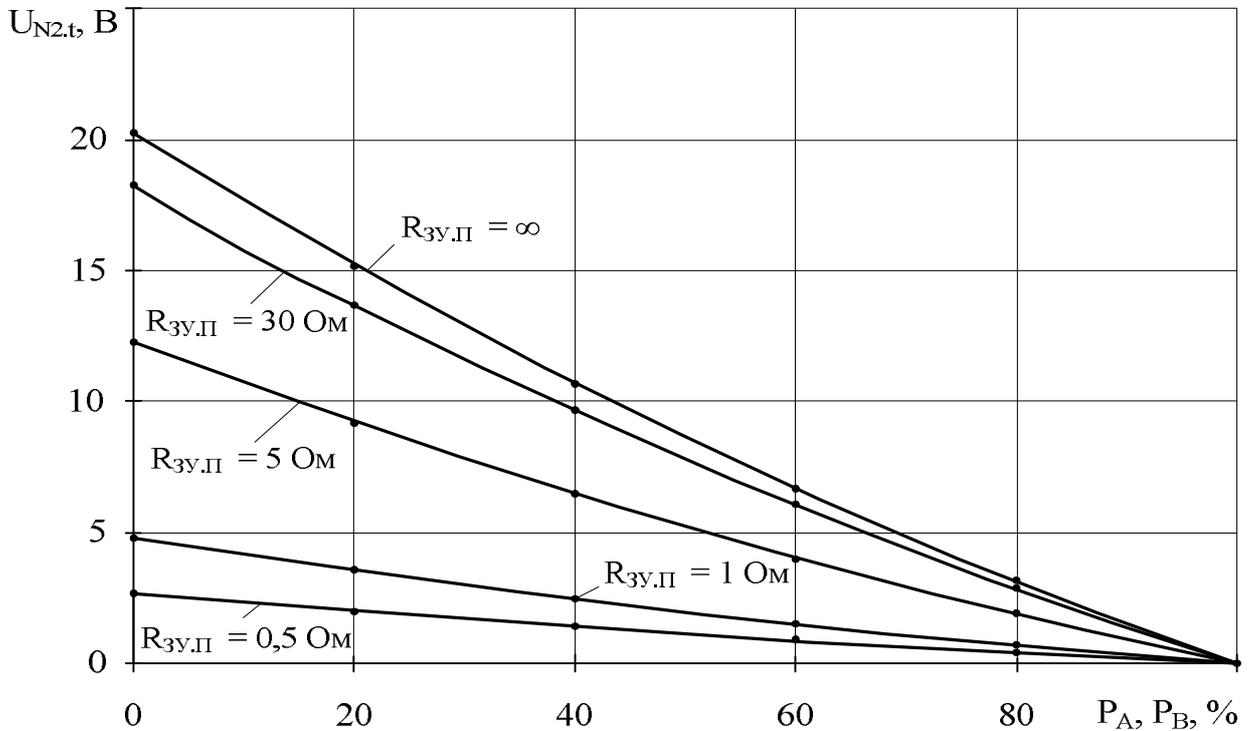


Рисунок 2.18 – График напряжения  $U_{N2,t} = f(P_{H,A}, P_{H,B})$  при нормальном режиме работы электрической сети при различных значениях сопротивления  $R_{3y, \Pi}$

Результаты компьютерного моделирования при обрыве нулевого провода электрической сети при изменении фазных нагрузок в одной или одновременно в двух при различных значениях сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{3У.П}$  (0,5, 1, 5, 30,  $\infty$  Ом) представлены в таблице 2.9.

По полученным результатам построены графики изменения напряжения  $U_{N2.t}$  при изменении нагрузки в одной и двух фазах для нормального режима работы электрической сети при различных сопротивлениях заземляющего устройства у потребителя  $R_{3У.П}$  – соответственно рисунки 2.19 и 2.20.

При анализе построенных графиков можно увидеть, что напряжение  $U_{N2.t}$  растёт с увеличением несимметрии однофазных нагрузок потребителя и увеличении сопротивления заземляющего устройства у потребителя. При отсутствии заземляющего устройства потребителя и при отсутствии нагрузки в одной фазе напряжение  $U_{N2.t}$  достигает значения 116,7 В, а при отсутствии нагрузки в двух фазах достигает значения 233,4 В.

Согласно [18, 114, 115], безопасным считается напряжение 20 В. Как, было показано выше, в настоящее время релейная защита не всегда своевременно выявляет обрыв нулевого провода, следовательно, электрическая сеть может работать в таком режиме длительное время, что является небезопасным для человека.

Представляет интерес соотношение изменения напряжения нулевой последовательности  $U_{0.2}$  и напряжения нейтрали потребителя относительно земли  $U_{N2.t}$  при обрыве нулевого провода и предельных значениях несимметрии в зависимости от величины сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{3У.П}$ . Такие характеристики, построенные по данным таблицы 2.9, приведены на рисунках 2.21 и 2.22.

Таблица 2.9 – Влияние сопротивления заземляющего устройства потребителя  $R_{ЗУ.П}$  на напряжения электрической сети при обрыве нулевого провода

Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Сопротивление заземляющего устройства потребителя $R_{ЗУ.П}$ , Ом									
			0,5					1				
A	B	C	$U_{A.N2},$ В	$U_{B.N2},$ В	$U_{C.N2},$ В	$U_{0,2},$ В	$U_{N2,t},$ В	$U_{A.N2},$ В	$U_{B.N2},$ В	$U_{C.N2},$ В	$U_{0,2},$ В	$U_{N2,t},$ В
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	100	100	226,4	205,3	204,2	13,05	1,77	226,6	205,2	204,1	13,28	3,172
			-3,18	-120,7	113,7	-2,85		-3,184	-120,7	113,6	-2,92	
60	100	100	245,1	199,9	198	28,27	3,83	245,7	199,8	197,8	28,79	6,877
			-2,68	-117,2	110,3	-2,35		-2,68	-117,1	110,1	-2,43	
40	100	100	267,2	194,4	191,9	46,23	6,27	268,2	194,1	191,5	47,15	11,26
			-2,08	-112,9	106	-1,76		-2,1	-112,7	105,7	-1,84	
20	100	100	293,7	188,8	186,5	67,73	9,183	295,2	188,5	186,1	69,21	16,53
			-1,38	-107,5	100,4	-1		-1,39	-107	100	-1,1	
0,1	99,9	99,9	325,6	183,9	183,1	93,78	12,71	328	183,7	182,8	96,02	22,93
			-0,52	-100,5	93,34	-0,19		-0,52	-99,8	92,67	-0,26	
0,001	100	100	325,8	183,8	183,1	93,94	12,74	328,2	183,6	182,8	96,18	22,97
			-0,51	-100,5	93,3	-0,187		-0,52	-99,8	92,6	-0,26	
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	80	100	220,5	221,7	198,1	13,81	1,87	220,7	221,8	197,8	14,07	3,36
			-5,9	-120,3	116,6	-63		-5,97	-120,3	116,6	-63,1	
60	60	100	234,1	236,4	181,9	32,08	4,35	234,5	236,8	181,3	32,77	7,82
			-8,9	-116,4	116,8	-62,7		-9	-116,3	116,8	-62,77	
40	40	100	253,4	256,7	159,6	57,38	7,78	254,3	257,5	158,2	58,85	14,05
			-12,67	-111,5	117,1	-62,2		-12,93	-111,3	117,2	-62,3	
20	20	100	283,4	286,9	126,5	94,72	12,84	285,6	289,2	123,7	97,72	23,34
			-17,55	-105,4	117,4	-61,5		-17,99	-105	117,5	-61,6	
0,1	0,1	99,9	335,8	337,2	73,22	154,9	21	341	342,6	67,22	161,3	38,53
			-23,67	-97,5	117,2	-60,37		-24,36	-96,9	117,4	60,46	
0,001	0,001	100	336,2	337,6	72,82	155,4	21,06	341,5	343	66,8	161,8	38,64
			-23,7	-97,5	117,2	-60,36		-24,4	-96,8	117,4	-60,5	

Продолжение таблицы 2.9

Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Сопротивление заземляющего устройства потребителя $R_{3y.п}$ , Ом									
			5					30				
A	B	C	$U_{A.N2,}$ В	$U_{B.N2,}$ В	$U_{C.N2,}$ В	$U_{0,2,}$ В	$U_{N2.t,}$ В	$U_{A.N2,}$ В	$U_{B.N2,}$ В	$U_{C.N2,}$ В	$U_{0,2,}$ В	$U_{N2.t,}$ В
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	100	100	227,5	204,8	203,7	14,17	8,65	228,3	204,5	203,3	14,96	13,53
			-3,194	-120,5	113,4	-3,12		-3,19	-120,3	113,2	-3,19	
60	100	100	247,8	199	196,9	30,87	18,85	249,7	198,3	196,1	32,73	29,58
			-2,7	-116,6	109,6	-2,63		-2,7	-116,1	109,1	-2,7	
40	100	100	272	193,1	190,3	50,83	31,04	275,5	192,1	189,3	54,16	48,96
			-2,1	-111,6	104,7	-2,04		-2,1	-110,7	103,8	-2,1	
20	100	100	301,4	187,3	184,7	75,1	45,87	307,2	186,3	183,8	80,51	72,78
			-1,4	-105,3	98,28	-1,33		-1,38	-103,7	96,67	-1,38	
0,1	99,9	99,9	337,7	182,9	182,1	105,1	64,17	346,8	182,3	182	113,5	102,6
			-0,52	-97	89,94	-0,45		-0,47	-94,6	87,38	-0,46	
0,001	100	100	337,9	182,9	182	105,2	64,28	347	182,3	182	113,7	102,8
			-0,51	-97,1	89,9	-0,44		-0,46	-94,5	87,32	-0,46	
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4			-3,61	-123,6	116,4		
80	80	100	221,2	222,4	196,8	15,08	9,2	221,6	222,9	195,9	15,98	14,45
			-6,2	-120,1	116,6	-63,3		-6,4	-119,9	116,6	-63,4	
60	60	100	236	238,6	178,6	35,52	21,7	237,5	240,2	176,1	38,04	34,39
			-9,6	-115,7	116,9	-63		-10,08	-115,3	116,9	-63,08	
40	40	100	258,1	261,9	152,4	64,81	39,59	262	265,8	147	70,46	63,69
			-13,99	-110,3	117,3	-62,5		-14,9	-109,4	117,4	-62,63	
20	20	100	294,8	299	111,8	110,3	67,36	304,5	308,6	100	122,7	111
			-19,77	-103,4	117,9	-61,86		-21,38	-101,8	118,1	-61,9	
0,1	0,1	99,9	365,2	366,8	40,73	189,8	115,9	392,4	393,1	12,17	220,4	199,3
			-27,1	-94,2	118,3	-60,6		-29,54	-91,5	119,2	-60,55	
0,001	0,001	100	365,7	367,3	40,2	190,4	116,3	393,1	393,8	11,53	221,1	199,9
			-27,14	-94,12	118,3	-60,64		-29,6	-91,4	119,2	-60,5	

Окончание таблицы 2.9

Нагрузка фаз, % от $P_{H.МАКС}$			Сопротивление заземляющего устройства потребителя $R_{ЗУ.П}$ , Ом				
			30				
А	В	С	$U_{A.N2,}$ В	$U_{B.N2,}$ В	$U_{C.N2,}$ В	$U_{0,2,}$ В	$U_{N2,t,}$ В
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4		
80	100	100	228,6	204,4	203,2	15,24	15,23
			-3,19	-120,2	113,1	-3,19	
60	100	100	250,4	198,1	195,9	33,38	33,37
			-2,7	-115,9	108,9	-2,7	
40	100	100	276,7	191,7	188,9	55,34	55,32
			-2,1	-110,4	103,4	-2,1	
20	100	100	309,2	185,9	183,5	82,45	82,45
			-1,37	-103,2	96,08	-1,37	
0,1	99,9	99,9	350	182,1	182,1	116,6	116,5
			-0,44	-93,7	86,45	-0,44	
0,001	100	100	350,3	182,1	182,1	116,7	116,7
			-0,44	-93,6	86,39	-0,44	
100	100	100	210,3	210,3	210,3	0	0
			-3,61	-123,6	116,4		
80	80	100	221,8	223,1	195,6	16,3	16,3
			-6,47	-119,8	116,6	-63,4	
60	60	100	238,1	240,8	175,3	38,94	38,93
			-10,25	-115,1	116,9	-63,08	
40	40	100	263,4	267,3	145,1	72,52	72,49
			-15,28	-109,1	117,4	-62,63	
20	20	100	308,3	312,3	95,6	127,4	127,4
			-21,94	-101,2	118,1	-61,88	
0,1	0,1	99,9	403,7	403,7	0,74	232,7	232,6
			-30,4	-90,5	119,6	-60,45	
0,001	0,001	100	404,4	404,4	0,047	233,5	233,4
			-30,44	-90,44	119,6	-60,44	

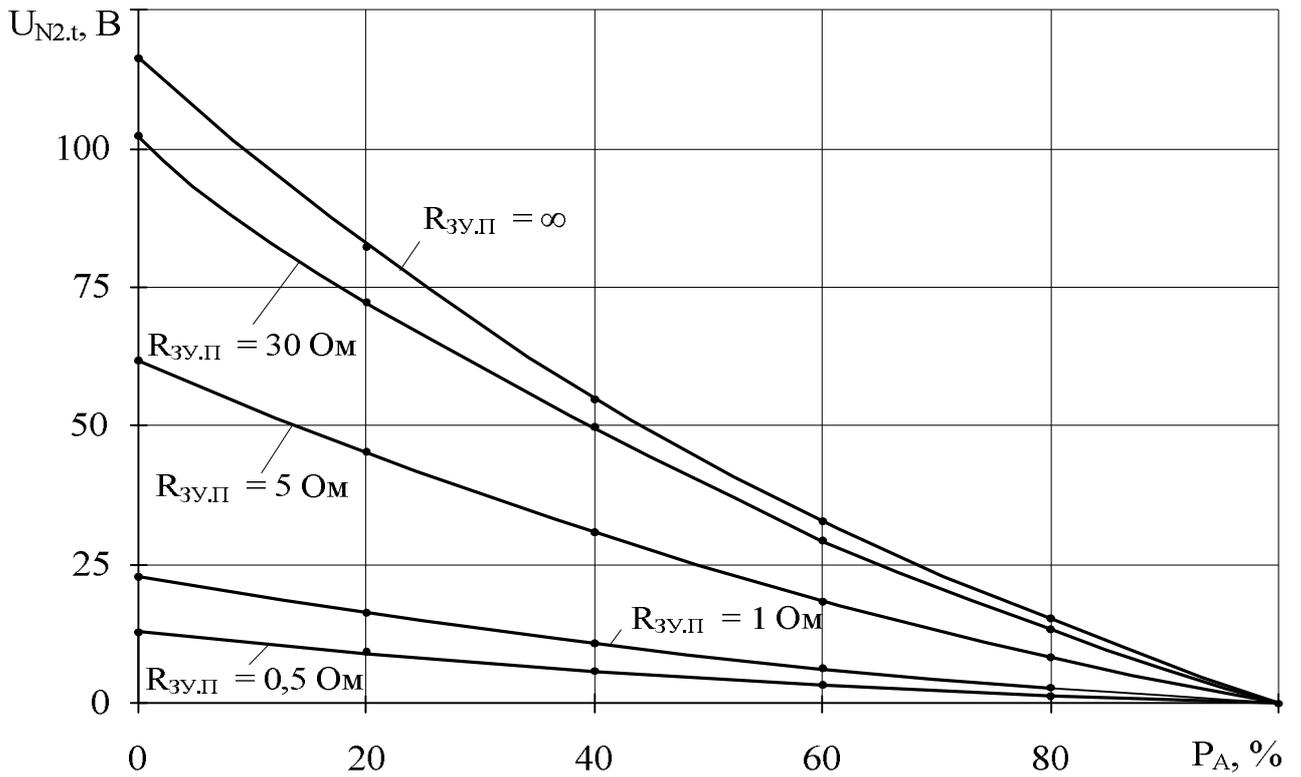


Рисунок 2.19 – График напряжения  $U_{N2,t} = f(P_{H,A})$  при обрыве нулевого провода и различных значениях сопротивления  $R_{3y,II}$

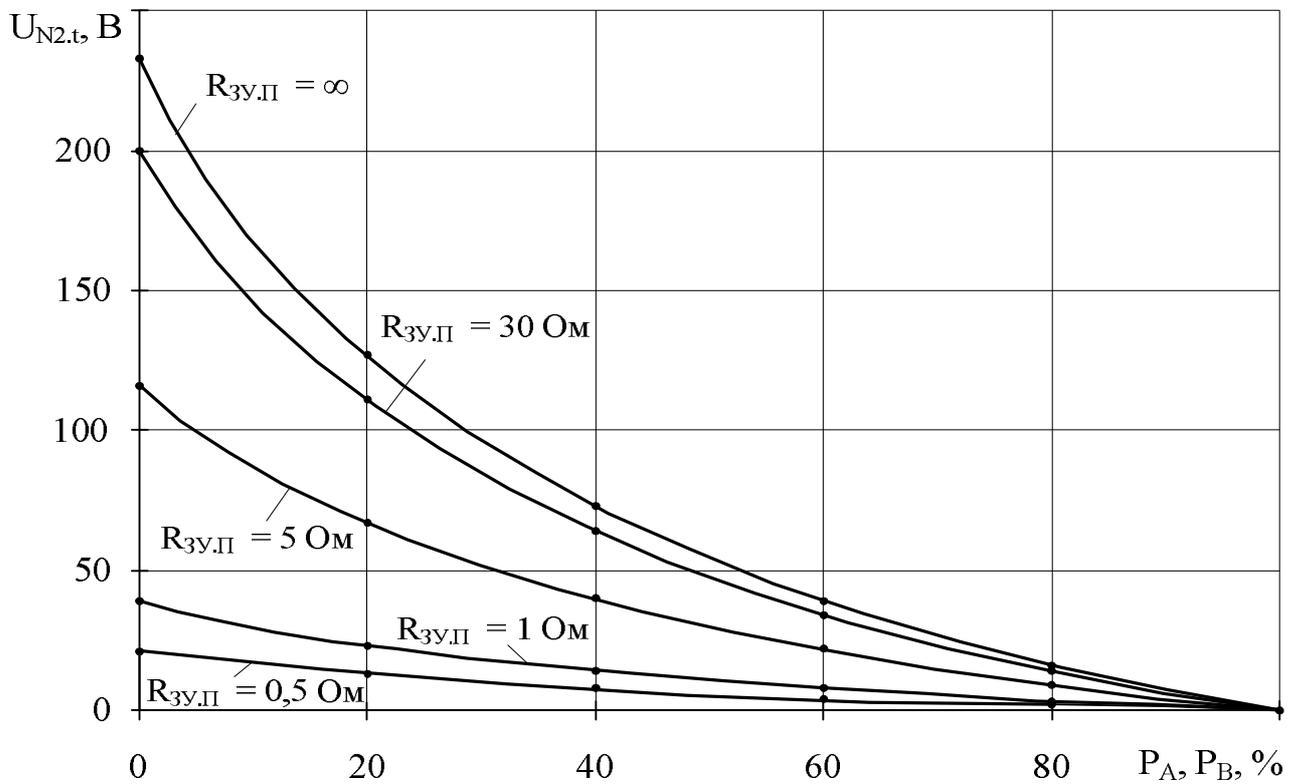


Рисунок 2.20 - График напряжения  $U_{N2,t} = f(P_{H,A}, P_{H,B})$  при обрыве нулевого провода и различных сопротивлениях заземляющего устройства у потребителя  $R_{3y,II}$

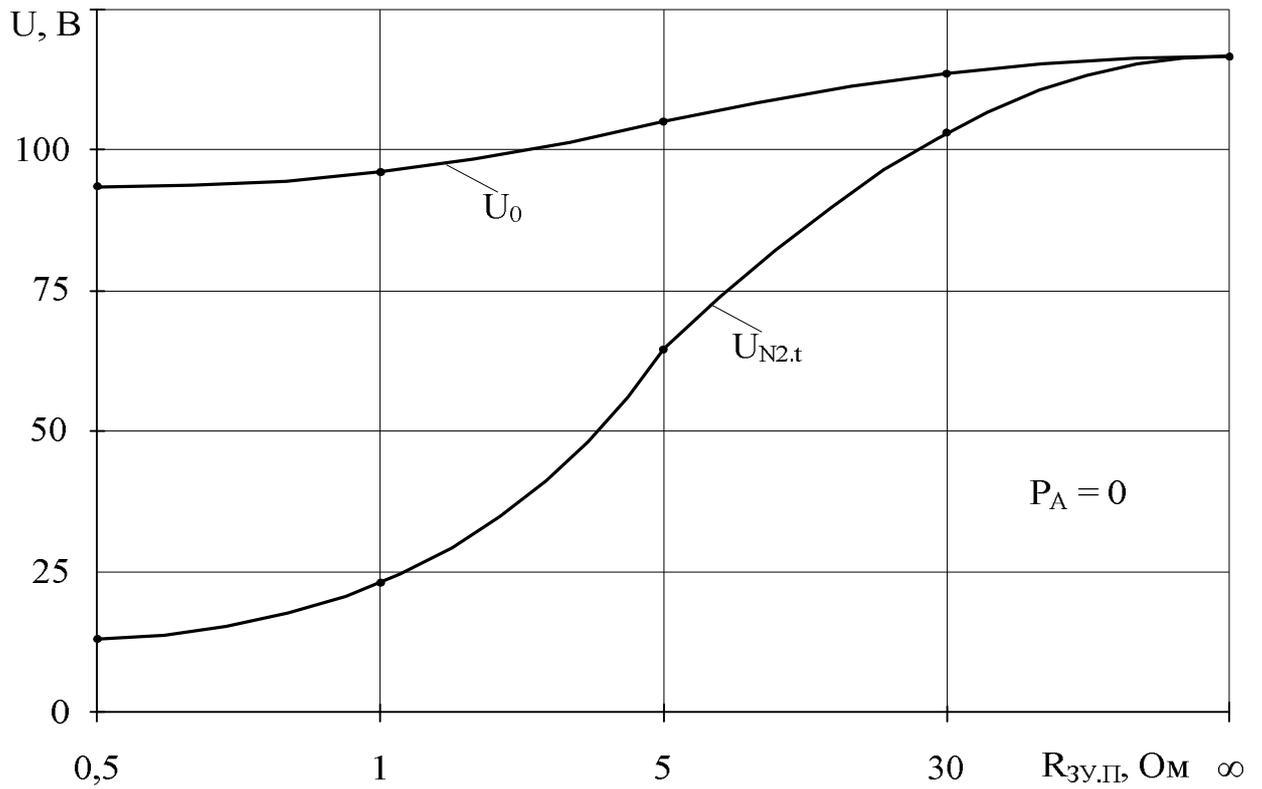


Рисунок 2.21 – Графики  $U_{N2,t} = f(R_{3y.п})$  и  $U_0 = f(R_{3y.п})$  при оборванном нулевом проводе и отсутствии нагрузки в фазе А

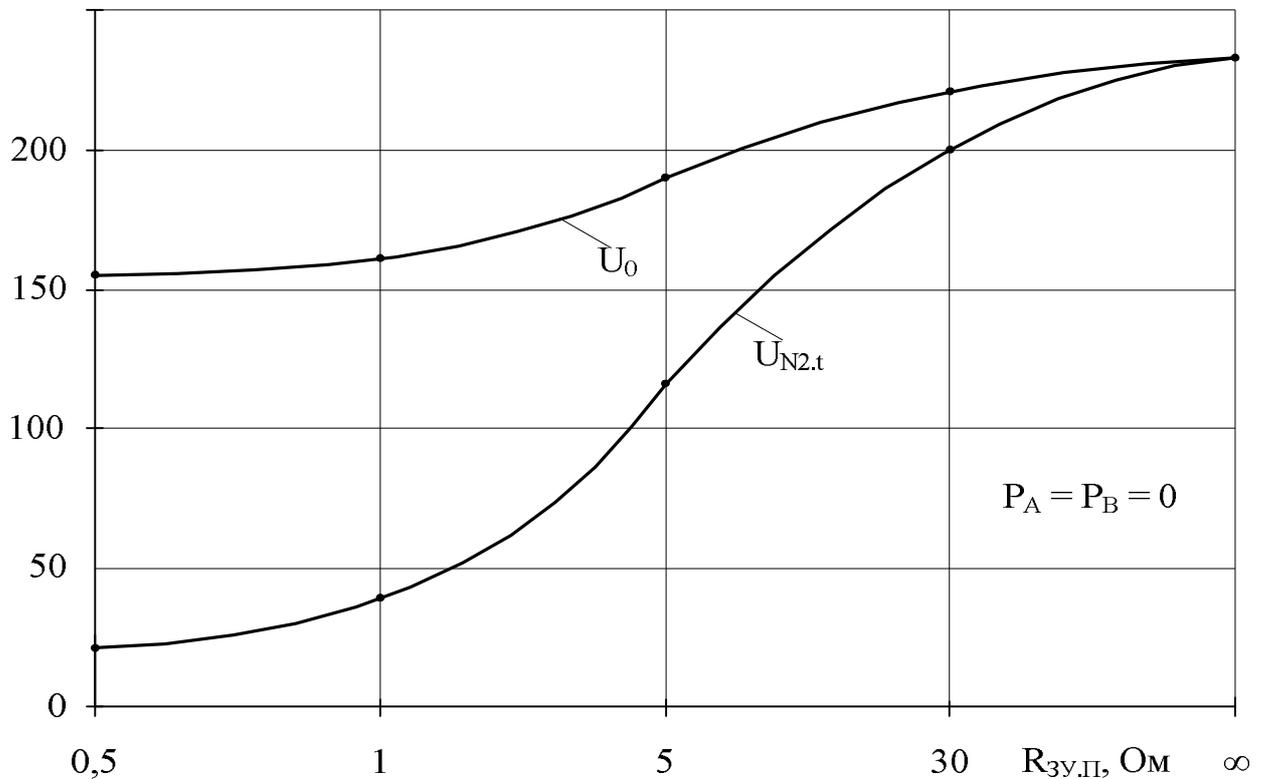


Рисунок 2.22 – Графики  $U_{N2,t} = f(R_{3y.п})$  и  $U_0 = f(R_{3y.п})$  при оборванном нулевом проводе и отсутствии нагрузки в фазах А и В

На рисунках 2.19 и 2.20 видно, что напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$  и напряжения нейтрали потребителя относительно земли  $U_{N2,t}$  в общем случае имеют разные значения и становятся равными друг другу только при отсутствии сопротивления заземляющего устройства, т.е. при  $R_{ЗУ,П} = \infty$ . При наличии заземляющего устройства потребителя и уменьшении его сопротивления напряжение  $U_{N2,t}$  становится существенно меньше напряжения  $U_{0,2}$ .

Представляет также интерес графическая интерпретация изменения положения нейтральной точки потребителя N2 на плоскости треугольника линейных напряжений сети при оборванном нулевом проводе, изменении фазных нагрузок потребителя и при отсутствии сопротивления заземляющего устройства, т.е. при  $R_{ЗУ,П} = \infty$ . По данным исследований (таблица 2.9) построен годограф движения потенциала нейтральной точки N2 потребителя при обрыве нулевого провода и изменении фазных нагрузок (рисунок 2.23), анализ которого даёт следующие результаты:

1. При симметричной нагрузке потребителя, когда  $P_{Н.А} = P_{Н.В} = P_{Н.С} = 100 \%$ , потенциал нейтрали потребителя N2 находится в геометрическом центре треугольника линейных напряжений  $\underline{U}_{AB,2}$ ,  $\underline{U}_{BC,2}$ ,  $\underline{U}_{CA,2}$  и совпадает с потенциалом земли t – рисунок 2.23,а. Напряжения фаз сети относительно нейтральной точки N2  $\underline{U}_{A,N2}$ ,  $\underline{U}_{B,N2}$ ,  $\underline{U}_{C,N2}$  представляют симметричную систему напряжений, т.е. они равны между собой и сдвинуты на 120 электрических градусов.

2. При уменьшении нагрузки только в одной фазе, например в фазе А ( $P_{Н.А} = 80 \%$ ;  $60 \%$ ;  $40 \%$ ;  $20 \%$ ;  $0 \%$ ), потенциал нейтральной точки начинает смещаться вниз и при полном отсутствии нагрузки на фазе А попадает на середину линейного напряжения  $U_{BC,2}$ . При этом напряжение на фазе А относительно нейтральной точки N2 увеличивается до значения  $U_{A,N2} = 1,5 \cdot U_{\Phi}$ , а напряжения двух других фаз уменьшаются до значения  $U_{B,N2} = U_{C,N2} = 0,867 \cdot U_{\Phi}$ , в сумме давая линейное напряжение  $U_{BC,2}$  – рисунок 2.23,б.

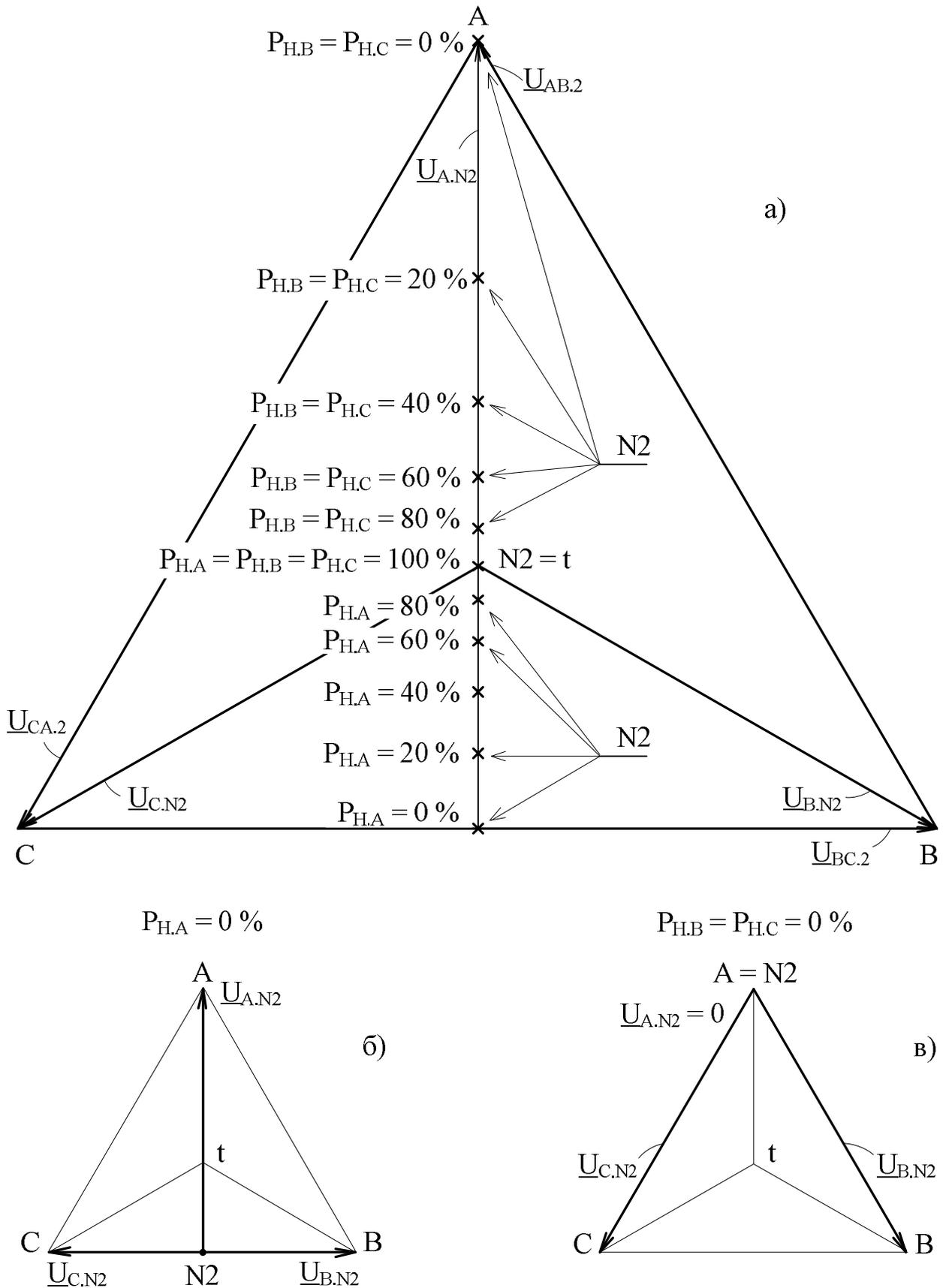


Рисунок 2.23 – Годограф движения потенциала нейтральной точки N2 потребителя при обрыве нулевого провода и изменении фазных нагрузок

3. При уменьшении нагрузки одновременно на двух фазах, например в фазах В и С ( $P_{Н.В} = P_{Н.С} = 80\%; 60\%; 40\%; 20\%; 0\%$ ), потенциал нейтральной точки N2 начинает смещаться вверх и при отсутствии нагрузки на фазах В и С попадает в вершину треугольника линейных напряжений в точку А. При этом напряжение на фазе А относительно нейтральной точки N2 становится равным нулю  $U_{А.N2} = 0$ , а напряжения двух других фаз возрастают до линейного значения и, соответственно, становятся равными  $U_{В.N2} = -U_{АВ.2}$  и  $U_{С.N2} = U_{СА.2}$  – рисунок 2.23,в.

### **2.3.5 Логические признаки, характеризующие режимы работы электрической сети напряжением 380 В при обрывах фазных и нулевого проводов воздушной линии**

Для определения структуры устройств защиты от несимметричных режимов работы электрической сети напряжением 380 В нужно, с одной стороны, знать параметры сети, на которые они должны реагировать, а с другой стороны, параметры, от которых следует отстраиваться.

Для оценки состояния электрической сети проведено исследование изменения напряжений фаз  $U_{Ai.N2}$ ,  $U_{Bi.N2}$ ,  $U_{Ci.N2}$  относительно нулевого провода N2 и напряжения нулевой последовательности  $U_{0.2}$  в конце воздушной линии.

Диапазоны изменения напряжений электрической сети напряжением 380 В для предельных её состояний в конце воздушной линии представлены в таблице 2.10.

На основе анализа этих данных можно определить логические признаки режимов работы электрической сети напряжением 380 В при нормальном режиме работы, обрыве фазного или нулевого провода воздушной линии (основных режимов, которые должна определять разрабатываемая система защиты), которые приведены в таблице 2.11. Они получены путем дискретизации по уровням контролируемых параметров – напряжений фаз относительно нулевого провода  $U_{\Phi i.N2}$  со стороны потребителя и напряжения нулевой последовательности  $U_{0.2}$ . Для рассмотрения исследуемых напряжений в относительных единицах в качестве базо-

вого напряжения принято фазное напряжение на зажимах трансформатора компьютерной модели при нормальном режиме работы сети и полной отсутствии нагрузки потребителей –  $U_{\Phi} = 233,7$  В.

Таблица 2.10 – Диапазоны изменения напряжений электрической сети напряжением 380 В в конце воздушной линии

Режим	Величина нагрузки потребителя, %	$R_{з\text{у.п.}}$ Ом	В месте возникновения несимметрии со стороны потребителя				
			$U_{A.N2}$ , В	$U_{B.N2}$ , В	$U_{C.N2}$ , В	$U_{0,2}$ , В	$U_{N2.t}$ , В
Нормальный	$P_{H.A} = 0$ $P_{H.B} = P_{H.C} = 100\%$	1	260,1	190,3	209,3	35,4	4,2
		$\infty$	260,7	190,0	209,3	36	17,7
	$P_{H.A} = P_{H.B} = 0$ $P_{H.C} = 100\%$	1	261,3	237,5	185,2	39,8	4,7
		$\infty$	261,9	237,7	184,6	60,6	19,9
Обрыв провода фазы А	$P_{H.B} = 0$ $P_{H.C} = 100\%$	1	0	233,3	188,9	55,6	4,78
		$\infty$	0	233,5	188,2	55,3	20,3
	$P_{H.B} = 100\%$ $P_{H.C} = 0$	1	0	188,9	260,3	82,7	4,78
		$\infty$	0	188,2	149,6	82,8	20,3
	$P_{H.B} = P_{H.C} = 0$	1	0	233,5	233,5	77,8	0
		$\infty$	0	233,5	233,5	77,8	0
Обрыв нулевого провода	$P_{H.A} = 0$ $P_{H.B} = P_{H.C} = 100\%$	1	328,7	183,8	182,9	96,5	22,8
		$\infty$	350,6	182,3	182,3	116,9	116,9
	$P_{H.A} = P_{H.B} = 0$ $P_{H.C} = 100\%$	1	342,2	343,8	66,4	162,5	38,4
		$\infty$	404,8	404,8	0	233,7	233,7

Анализ логических признаков показывает:

1. При нормальном режиме работы электрической сети и изменении несимметрии нагрузок потребителя в диапазоне 0–100 % их максимальной мощности  $P_{H.MAKC}$  напряжения на фазах  $U_{\Phi i.N2}$  меняются в пределах  $(0,79-1,12) \cdot U_{\Phi}$ , напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  – в пределах  $(0-0,17) \cdot U_{\Phi}$ .

2. При обрыве фазного провода существенными признаками этого несимметричного режима являются отсутствие напряжения на проводе повреждённой фазы со стороны потребителя  $U_{\Phi i.N2} = 0$  и изменение напряжения нулевой последовательности в пределах  $U_0 = (0,236-0,354) \cdot U_{\Phi}$ .

3. При обрыве нулевого провода и предельной несимметрии нагрузок напряжение нулевой последовательности может достигать значений  $U_{0,2} = (0,5-1,0) \cdot U_{\Phi}$ , а напряжения на фазах находиться в пределах  $U_{\Phi i, N2} = (0-1,732) \cdot U_{\Phi}$ .

Таблица 2.11 – Логические признаки режимов работы электрической сети напряжением 380 В

Режим	Признаки	
	$U_{\Phi i, N2}, \text{ о.е.}$	$U_{0,2}, \text{ о.е.}$
Нормальный	$1,12 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i, N2} \geq 0,79 \cdot U_{\Phi}$	$0,17 \cdot U_{\Phi} \geq U_{0,2} \geq 0$
Обрыв фазного провода	$U_{\Phi i, N2} = 0$	$0,354 \cdot U_{\Phi} \geq U_{0,2} \geq 0,236 \cdot U_{\Phi}$
Обрыв нулевого провода	$1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i, N2} \geq 1,50 \cdot U_{\Phi}$ $1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i, N2} \geq 0,866 \cdot U_{\Phi}$	$0 \leq U_{0,2} \leq 0,50 \cdot U_{\Phi}$
	$1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i, N2} \geq 1,732 \cdot U_{\Phi}$ $1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i, N2} > 0$	$0 \leq U_{0,2} \leq 1,0 \cdot U_{\Phi}$

На основании анализа логических признаков можно определить критерии выявления режимов работы электрической сети:

1 Нормальный режим работы сети.

1.1 Фазные напряжения относительно нулевого провода  $U_{\Phi i, N2}$  должны находиться около фазного значения с отклонением от него с учётом возникновения несимметрии фазных нагрузок.

1.2 Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  в зависимости от несимметрии фазных нагрузок может достигать определённых значений, от которых система защиты должна отстраиваться.

2 Обрыв фазного провода.

2.1 Фазное напряжение на повреждённой фазе  $U_{\Phi i, N2}$  за местом обрыва становится равным нулю. В тоже время, как будет показано в следующем разделе, при определённых режимах на этом оборванном проводе из-за смещения потенциала

нулевого провода может появляться напряжение в пределах 4–13 В. Кроме того, на проводе из-за высших гармоник или какого-либо наведённого напряжения также может быть некоторое напряжение. Следовательно, от этих напряжений также необходимо отстраивать систему защиты.

2.2 Напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  находится в определённом диапазоне, превышающем его предельные значения для нормального режима работы. Следовательно, критерий (уставка по напряжению) должен быть между этими значениями напряжения  $U_{0,2}$ .

3 Обрыв нулевого провода. Значения фазных напряжений относительно нулевого провода  $U_{\Phi i, N2}$  и напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$  зависят от напряжения несимметрии фазных нагрузок. Для того чтобы напряжение нулевой последовательности использовать в качестве критерия выявления обрыва нулевого провода в электрической сети должна присутствовать определённая несимметрия фазных нагрузок, при которой напряжение  $U_{0,2}$  превысит предельное значение этого напряжения при нормальном режиме работы электрической сети.

С учётом проведённого анализа приняты критерии выявления режимов работы электрической сети, установленные в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Критерии выявления режимов работы электрической сети напряжением 380 В

Параметр	Нормальный режим	Аварийный режим
Напряжения на фазах $U_{\Phi i}$	$U_{\Phi i, N2} > U_{уст1}$	$U_{\Phi i, N2} \leq U_{уст1} = 0,15 \cdot U_{\Phi} = 33 \text{ В}$
Напряжение нулевой последовательности $U_0$	$U_{0,2} \leq U_{уст2}$	$U_{0,2} > U_{уст2} = 0,2 \cdot U_{\Phi} = 44 \text{ В}$

Таким образом, видна взаимосвязь контролируемых параметров и характерных режимов работы электрической сети. После этого можно определить структуру дополнительных функций, которыми необходимо дополнить микропроцессорные счётчики электрической энергии с целью выявления обрывов фазных и

нулевого проводов, или построить функциональную схему отдельно выполняемого анализатора режимов работы электрической сети.

#### **2.4 Анализ логических признаков, характеризующих различные режимы работы воздушной линии напряжением 380 В**

Так как конечной целью исследований на компьютерной модели является выявление характерных признаков нормальных и аварийных режимов работы электрической сети, то для решения поставленной задачи по разработке устройств их опознавания крайне важным является выявление максимально и минимально возможных величин действующих значений напряжений во всех возможных режимах работы сети, которые могут возникнуть в процессе её эксплуатации.

В разделе 2.3 проведён подробный анализ основных режимов работы электрической сети, представленных на рисунке 2.3 и в таблице 2.1:

1. Нормальный режим работы при симметричной и несимметричной нагрузке фаз – им соответствуют режимы 1, 2, 3.
2. Обрывы фазных проводов – им соответствуют режимы 7 и 8.
3. Обрывы нулевого провода им соответствуют режимы 12 и 13.

Полные исследования всех 34 режимов работы электрической сети напряжением 380 В представлены в приложении Г к диссертации. Для удобства представления и анализа результатов исследований в таблице 2.13 дана выборка для каждого режима предельных максимальных и минимальных значений напряжений фаз относительно нулевого провода  $U_{\text{Ф.МАКС}}$  и  $U_{\text{Ф.МИН}}$ , максимальных и минимальных значений напряжения нулевой последовательности  $U_{0.\text{МАКС}}$  и  $U_{0.\text{МИН}}$ , максимального напряжения нулевого провода относительно земли  $U_{\text{N2,t}}$  и максимального напряжения на оборванном фазном проводе со стороны потребителя  $U_{\text{ОБ.МАКС}}$ .

Исследования проведены при изменении следующих параметров:

- фазной нагрузки потребителей электроэнергии в одной или одновременно двух фазах;

– сопротивление заземляющего устройства потребителя рассматривалось либо отключенным ( $R_{3y, \Pi} = \infty \text{ Ом}$ ), либо сопротивление изменялось в пределах от 1 до  $\infty \text{ Ом}$ ;

– сопротивление замыкания упавшего на землю фазного или нулевого провода  $R_{033}$  (в соответствующих режимах).

Для удобства анализа и наглядности обоснования принимаемых решений о целесообразности использования рассматриваемых значений напряжений для распознавания аварийных режимов эти параметры, сведённые в таблицы 2.13, целесообразно нанести на графики, т.е. перейти к графическому анализу. На координатные сетки графиков по горизонтальной оси отложим номера режимов, а по вертикальной оси – численные значения параметров. На рисунках 2.24 и 2.25 представлены соответственно предельные значения (максимальные и минимальные) фазных напряжений и напряжений нулевой последовательности, а на рисунке 2.26 – максимальные значения напряжений между нулевым проводом землёй.

Проведём анализ предельно возможных значений фазных напряжений  $U_{\Phi i, N2}$  и напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$  в конце линии с целью выявления возможности использования их в качестве исходной информации для системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов ВЛ-380В. Критерием целостности фазных проводов примем условие, что фазное напряжение на любой из фаз  $U_{\Phi i, N2}$  должно быть больше напряжения некоторой уставки  $U_{уст1}$  (таблица 2.12)

$$U_{\Phi i, N2} > U_{уст1} = 0,15 \cdot U_{\Phi} = 33 \text{ В}, \quad (2.1)$$

а в аварийном режиме должно быть меньше этой уставки

$$U_{\Phi i, N2} \leq U_{уст1} = 0,15 \cdot U_{\Phi} = 33 \text{ В}. \quad (2.2)$$

Критерием целостности нулевого провода примем условие, что напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  должно быть меньше напряжения некоторой уставки  $U_{уст2}$  (таблица 2.12)

$$U_{0,2} \leq U_{уст2} = 0,2 \cdot U_{\Phi} = 44 \text{ В}, \quad (2.3)$$

а в аварийном режиме должно быть больше этой уставки

$$U_{0,2} > U_{уст2} = 0,2 \cdot U_{\Phi} = 44 \text{ В}. \quad (2.4)$$

Таблица 2.13 – Выборка основных результатов исследований электрической сети напряжением 380 В с нагрузкой в конце линии при различных режимах её работы

№ режима работы сети по табл. 2.1 и схемы по рис. 2.3	Режим работы сети	Предельные значения напряжений в конце ВЛ-380 В						На обр-вавшей-ся фазе со стороны потребителя	Со-противление в месте ОЗЗ	
		$\frac{U_{Ф.МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{Ф.МИН}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{0.МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{0.МИН}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{NЛ.МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{ОБ.МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$			$R_{ОЗЗ}$
		$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$			Ом
1	Нормальный (НР)	210,5	210,5	0	0	0				
		1-∞	1-∞	1-∞	1-∞	1-∞				
2,3	Нормальный	260,5	188,6	37,48	0	20,07				
		∞	∞	∞	1-∞	∞				
4,5,6	НР. Откл. авт. выкл. в фазах А, А и В потребителя	261,2	188,4	37,99	0,458	20,35				
		∞	∞	∞	1	∞				
7,8	Обрыв фазы А (ОФ А) в конце ВЛ	260,6	0	82,57	55,37	20,2	0			
		1-∞	1-∞	∞	∞	∞	1-∞			
9	ОФ А в конце ВЛ + откл. АВ в фазе В потребителя	233,6	0	77,59	55,39	20,35	0			
		1-∞	1-∞	1-∞	∞	∞	1-∞			
10	ОФ А и В в конце ВЛ	233,2	0	77,73	62,79	20,35	0			
		1-∞	1-∞	1-∞	∞	∞	1-∞			
11	ОФ А, В и С в конце ВЛ									
12,13	Обрыв нул. провода в конце ВЛ (ОН)	398	6,852	226,1	0	226,1				
		∞	∞	∞	1-∞	∞				
14,15	ОН + откл. АВ в фазе А потребителя	402,4	3,999	229,8	5,398	229,8				
		∞	∞	∞	1	∞				
16	ОН + откл. АВ в фазах А и В потребителя	404,8	0	233,7	0	233,7				
		∞	∞	∞	∞	∞				
17-18	Обрыв нулевого провода и фазы А в конце ВЛ	399,9	0	132	0	229,8	0			
		∞	1-∞	∞	∞	∞	1-∞			
19	Обрыв нулевого провода и фазы А в конце ВЛ + откл. АВ в фазе В потребителя	404,8	0	134,9	68,77	233,7	0			
		∞	1-∞	∞	∞	∞	1-∞			
20	Обрыв нулевого провода и фаз А и В в конце ВЛ	228	0	76,01	0	233,7	0			
		1	1 - ∞	∞	∞	∞	1 - ∞			

Продолжение таблицы 2.13

№ режима работы сети по табл. 2.1 и схемы по рис. 2.3	Режим работы сети	Предельные значения напряжений в конце ВЛ-380 В					На оборвавшейся фазе со стороны потребителя	Сопротивление в месте ОЗЗ		
		$\frac{U_{Ф. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{Ф. МИН}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{0. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{0. МИН}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{НЛ. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$			$\frac{U_{ОБ. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$R_{ОЗЗ}$
		$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$			$\frac{В}{Ом}$	Ом
21	Обрыв фазы А в конце ВЛ с замыканием её на землю со стороны источника	276,9	0	106,2	57,86	244,1	0	0,01		
		1	1 - ∞	1	∞	∞	1 - ∞			
21	Обрыв фазы А в конце ВЛ с замыканием её на землю со стороны источника	233,6	0	77,88	55,47	25,61	0	100		
		1	∞	1	∞	∞	1 - ∞			
22	Обрыв фазы А в конце ВЛ с замыканием её на землю со стороны потребителя	233,5	0,059	77,62	50,9	19,83	19,83	0,01		
		1 - ∞	1	1	∞	∞	∞			
22	Обрыв фазы А в конце ВЛ с замыканием её на землю со стороны потребителя	233,5	0,037	77,62	52,94	19,96	12,65	100		
		1 - ∞	1	1	∞	∞	∞			
23	Обрыв нулевого провода в конце ВЛ с замыканием её на землю со стороны источника	398	6,85	226	0,017	226,1		0,01		
		∞	∞	∞	1	∞				
23	Обрыв нулевого провода в конце ВЛ с замыканием её на землю со стороны источника	398	6,85	226	0,052	226,1		100		
		∞	∞	∞	1	∞				
24	Обрыв нулевого провода в конце ВЛ с замыканием его на землю со стороны потребителя	328,4	83,14	144,3	0,041	139,5 со стороны источника		0,01		
		1 - ∞	1 - ∞	1 - ∞	1 - ∞	∞				
24	Обрыв нулевого провода в конце ВЛ с замыканием его на землю со стороны потребителя	394,6	10,49	221,1	0,053	215,3		100		
		∞	∞	∞	1	∞				
25	Короткое замыкание фазы А на нулевой провод в конце ВЛ	327,6	0	165,5	133,8	88,64				
		∞	1 - ∞	∞	1	∞				
26	Короткое замыкание фаз А и В на нулевой провод в конце ВЛ	317,7	0	105,9	92,05	56,71				
		∞	1 - ∞	∞	1	∞				
27	Короткое замыкание фаз А и В в конце ВЛ	233,4	105,2	37,48	0	20,07				
		1 - ∞	1 - ∞	∞	∞	∞				
28	Трёхфазное металлическое короткое замыкание в конце ВЛ	0	0	0	0	0				
		∞	1	∞	1	∞				
29	Обрыв нулевого провода в конце ВЛ с замыканием его конца со стороны потребителя на фазу А	403,9	300,1	232,9	170,4	232,9				
		∞	1	∞	1	∞				

Продолжение таблицы 2.13

№ режима работы сети по табл. 2.1 и схемы по рис. 2.3	Режим работы сети	Предельные значения напряжений в конце ВЛ-380 В					Сопротивление в месте ОЗЗ	Характер изменения нагрузок фаз ВЛ	
		$\frac{U_{\text{ф. МАКС}}}{R_{\text{ЗУ.П}}}$	$\frac{U_{\text{ф. МИН}}}{R_{\text{ЗУ.П}}}$	$\frac{U_{\text{0. МАКС}}}{R_{\text{ЗУ.П}}}$	$\frac{U_{\text{0. МИН}}}{R_{\text{ЗУ.П}}}$	$\frac{U_{\text{НЛ. МАКС}}}{R_{\text{ЗУ.П}}}$	$R_{\text{ОЗЗ}}$		
		$\frac{\text{В}}{\text{Ом}}$	$\frac{\text{В}}{\text{Ом}}$	$\frac{\text{В}}{\text{Ом}}$	$\frac{\text{В}}{\text{Ом}}$	$\frac{\text{В}}{\text{Ом}}$	Ом		
30	Металлическое замыкание фазы А на нулевой провод в конце ВЛ1	ВЛ1	310,7	0	141,2	131,7	44,01	Нагрузка фаз ВЛ1 – vario, а в ВЛ2 $P_A = P_B = P_C = 100\% = \text{const}$	
			1; ∞	1- ∞; 1- ∞	1; ∞	1; 1	1; 1		
		ВЛ2	242,6	167,5	39,84	33,47	64,3		
			1; 1	1; 1	1; 1	1; ∞	1; ∞		
		ВЛ1	309,8	0	137,5	131	52,8		Нагрузки соответствующих фаз обеих ВЛ изменяются синфазно
			1; ∞	1- ∞; 1- ∞	1; ∞	1; 1	1; 1		
ВЛ2	283,5	167,5	59,39	12,5	83,8				
	1; 1	1; 1	1; 1	1; ∞	1; ∞				
31	Двухфазное замыкание на землю фаз А и В в конце ВЛ1 (каждая фаза замкнута на землю через отдельное переходное сопротивление)	ВЛ1	270,1	61,01	54,31	2,383	130,9	Нагрузка фаз ВЛ1 – vario, а в ВЛ2 $P_A = P_B = P_C = 100\% = \text{const}$	
			1; 10	1; 10	1; 10	1; 10	10; 30		
		ВЛ2	218,7	172,6	16,03	4,183	110,5		
			1; 10	10; 30	1; 10	10; 30	10; 30		
		ВЛ1	257,2	184,7	37,89	0,2774	16,97		100
			10; 30	10; 30	10; 30	10; 30	10; 30		
ВЛ2	218,2	201,3	9,524	0,146	15,37				
	1; 10	1; 10	1; 10	1; 10	1; 10				
31	Двухфазное замыкание на землю фаз А и В в конце ВЛ1 через одно общее сопротивление	ВЛ1	270,1	61,93	54,19	2,226	130,6	Нагрузка фаз ВЛ1 – vario, а в ВЛ2 $P_A = P_B = P_C = 100\% = \text{const}$	
			1; 10	1; 10	1; 10	1; 10	10; 30		
		ВЛ2	218	171	15,99	1,044	110,3		
			1; 10	10; 30	1; 10	10; 30	10; 30		
		ВЛ1	255,5	83	37,48	0,1413	18,65		100
			10; 30	10; 30	10; 30	10; 30	10; 30		
ВЛ2	213,5	167,6	9,385	0,0736	14,45				
	1; 10	1-10; 10-30	1; 10	1; 10	1; 10				

Окончание таблицы 2.13

№ режима работы сети по табл. 2.1 и схемы по рис. 2.3	Режим работы сети		Предельные значения напряжений в конце ВЛ-380 В					Сопротивление в месте ОЗЗ	Характер изменения нагрузок фаз ВЛ
			$\frac{U_{Ф. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{Ф. МИН}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{0. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{0. МИН}}{R_{ЗУ.П}}$	$\frac{U_{NЛ. МАКС}}{R_{ЗУ.П}}$	$R_{ОЗЗ}$	
			$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	$\frac{В}{Ом}$	Ом	
32	Металлическое замыкание фаз А и В в конце ВЛ1	ВЛ1	254,9	83,57	37,08	0	11,31		Нагрузка фаз ВЛ1 – vario, а в ВЛ2 $P_A=P_B=P_C=100\%$
			1; ∞	1; ∞	1; ∞	1; 1-∞	1; 1		
		ВЛ2	214,2	167,5	10,24	0	16,89		
			1; 1	1; ∞	1; 1	1; ∞	1; ∞		
33	Нормальный	ВЛ1	257,1	185,8	37,08	0,269	11,31		Нагрузка фаз ВЛ1 – vario, а в ВЛ2 $P_A=P_B=P_C=100\%$
			1; ∞	1; ∞	1; ∞	1; 1	1; 1		
		ВЛ2	219	200,7	10,24	0,0695	16,89		
			1; 1	1; 1	1; 1	1; ∞	1; ∞		
34	Нормальный	ВЛ1	270,1	180,4	46,71	0,334	4,9		Нагрузки соответствующих фаз обеих ВЛ изменяются синфазно
			1; 1	1; 1	1; 1	1; ∞	1; ∞		
		ВЛ2	270,6	180,1	47,2	0,0336	5,794		
			1; ∞	1; ∞	1; ∞	1; 1	1; ∞		

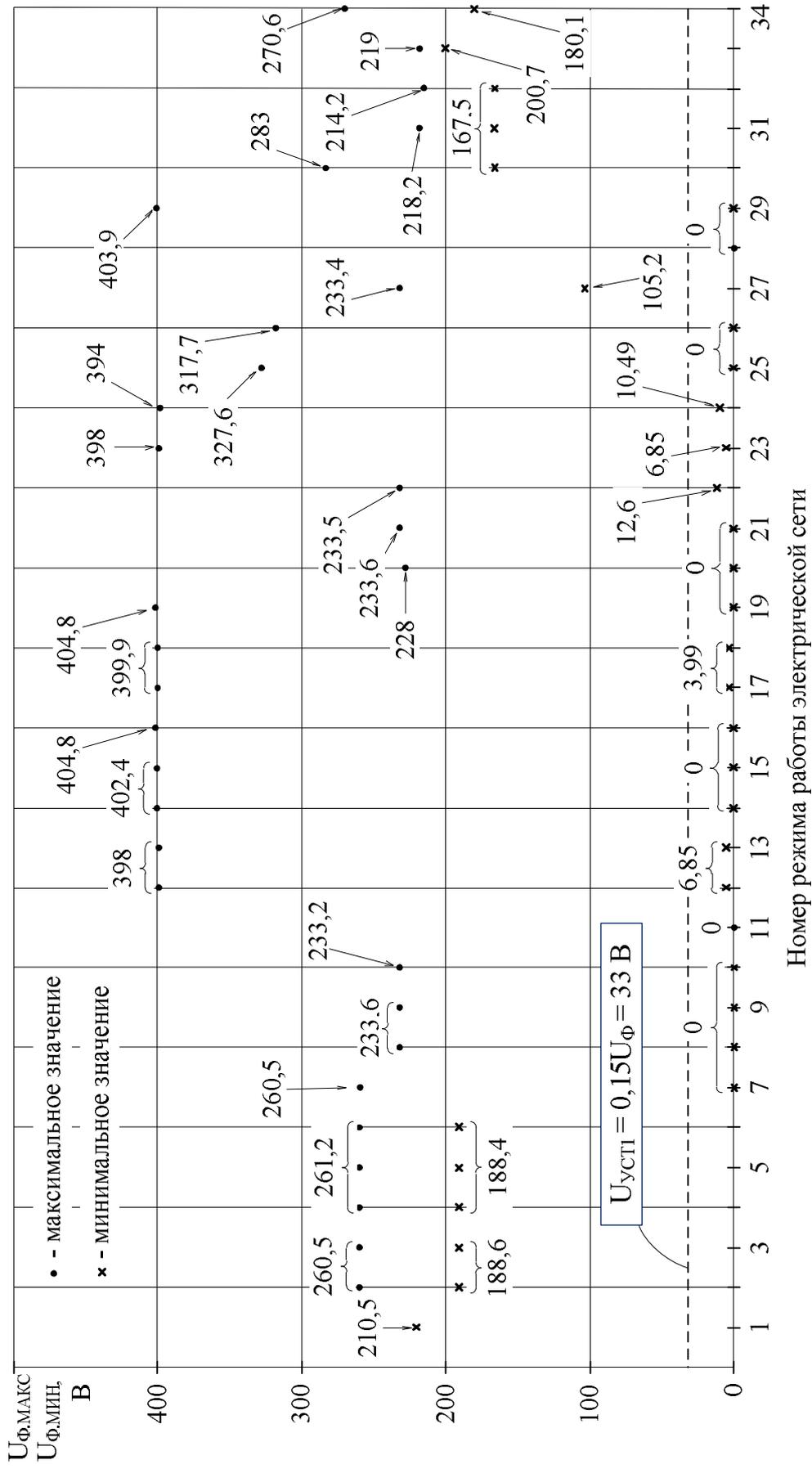


Рисунок 2.24 – Предельно возможные значения фазных напряжений в конце воздушной линии напряжением 380 В при различных режимах её работы

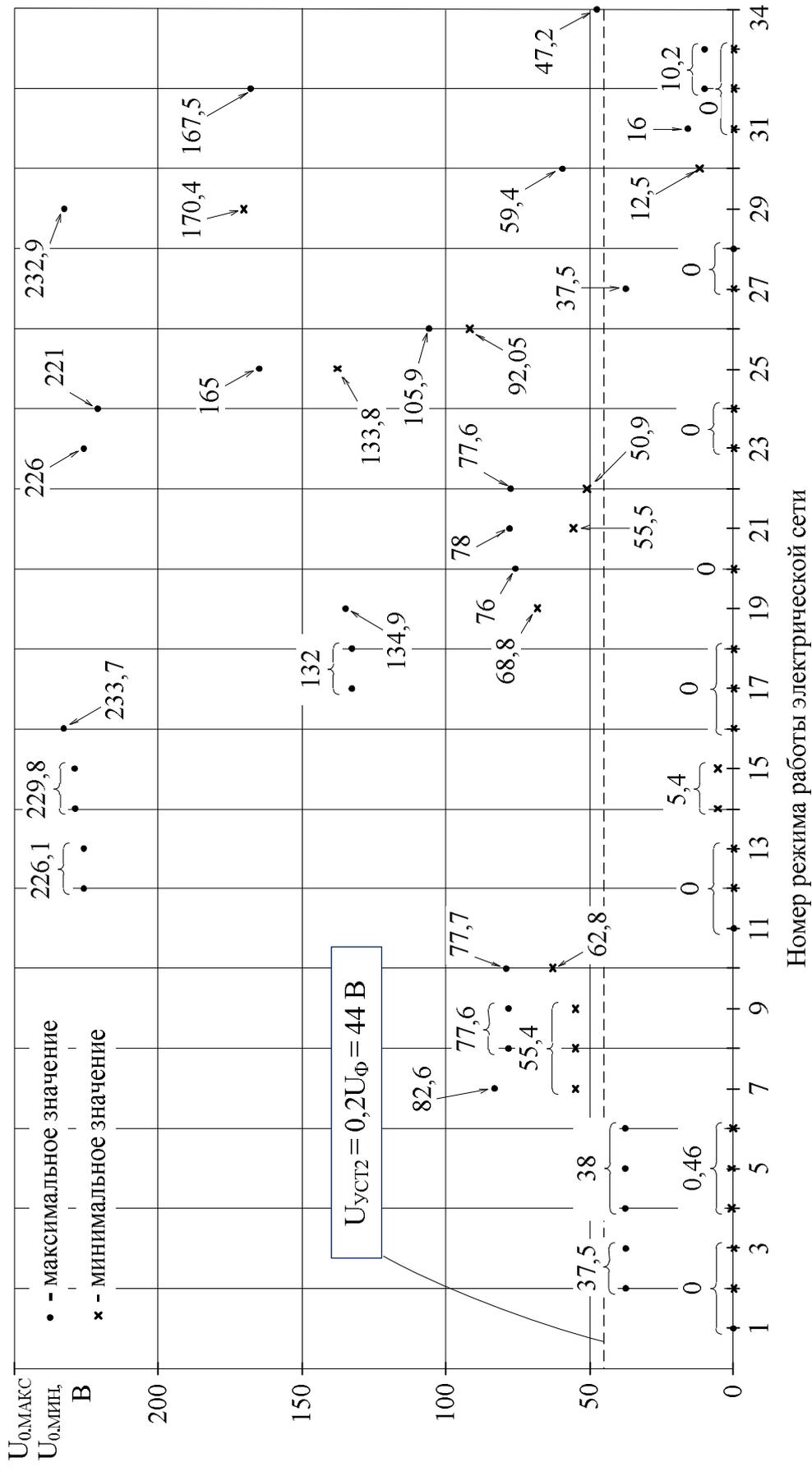


Рисунок 2.25 – Предельно возможные напряжения нулевой последовательности в конце воздушной линии напряжением 380 В при различных режимах её работы

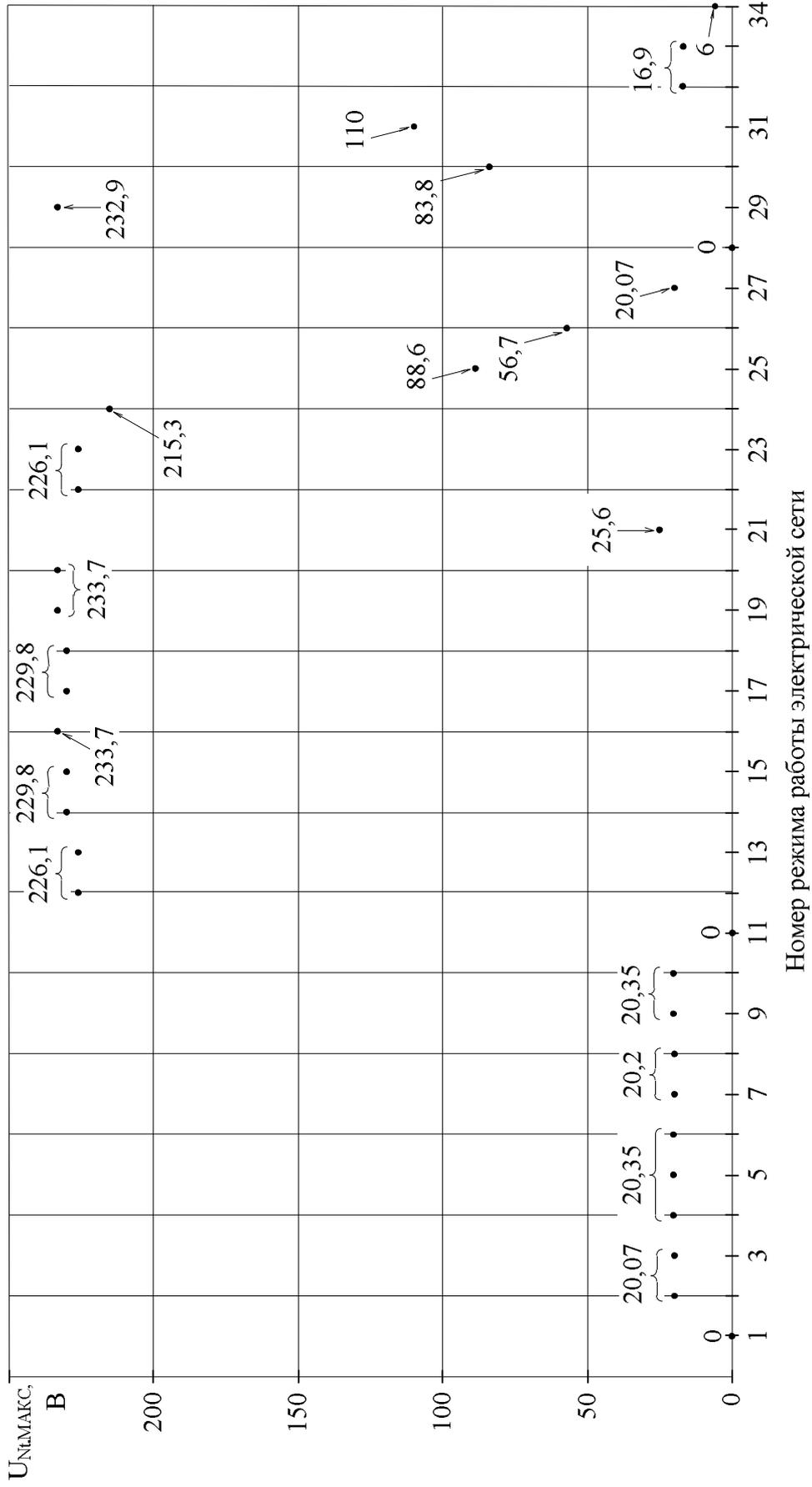


Рисунок 2.30 – Предельно возможные напряжения нулевой точки потребителя относительно земли в конце воздушной линии напряжением 380 В при различных режимах её работы

С использованием информации, приведённой на рисунке 2.24, проанализируем соотношения предельно возможных максимальных и минимальных значений фазных напряжений  $U_{\Phi i.N2}$  в конце линии при различных режимах её работы с напряжением минимальной уставки  $U_{уст1}$ . Результаты анализа сведём в таблицу 2.14:

1. Первые шесть режимов относятся к нормальным, в которых фазные напряжения  $U_{\Phi i.N2}$  больше значения уставки  $U_{уст1} = 33$  В, поэтому в третьей строке табл. 12.5 в соответствующих колонках проставим «+», т.е. режим определяется верно.

2. Режимы с 7-го по 11-й относятся к аварийным в связи с обрывами фазных проводов. На фазах с оборванным проводом напряжение  $U_{\Phi i}$  становится меньше уставки  $U_{уст1}$  и четко определяется рассматриваемый режим – поэтому проставляем в соответствующих колонках «+».

3. Режимы с 12-го по 16-й относятся к аварийным в связи с обрывом нулевого провода. Здесь предельное минимальное напряжение меньше уставки, а предельное максимальное напряжение больше уставки. Эти напряжения зависят от несимметрии нагрузок по фазам. Следовательно, при отсутствии несимметрии или её малом значении критерий работать не будет, он сработает при значительной несимметрии. Таким образом, нужно говорить о частичном срабатывании критерия, а в соответствующих колонках проставим знак «±».

4. Режимы с 17 по 22 связаны со сложными повреждениями ВЛ, одно из которых является обрыв фазного провода. Во всех случаях напряжение на одной из фаз не превышает 12,6 В (22-й режим), соответственно, ставим «+».

5. Режимы 23-й и 24-й связаны с обрывами нулевого провода (аналогично пункту 3) – проставляем «±».

6. Режимы 25-й и 26-й связаны с однофазным и двойным коротким замыканием на нулевой провод, при этом на повреждённых фазах напряжения будут равны нулю – проставляем «+».

7. При междуфазном коротком замыкании (режим 27) напряжения всех фаз больше уставки – проставляем «-».

Таблица 2.14 – Анализ возможности использования выбранных параметров для распознавания аварийных режимов работы электрической сети

Возможность использования параметра	Номера режимов работы электрической сети											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{\Phi i.N2}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	±
$U_{0.N2}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	±
Возможность использования системы защиты	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+*
	Нормальный режим (НР)						Аварийный режим					

Продолжение таблицы 2.14

Возможность использования параметра	Номера режимов работы электрической сети											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$U_{\Phi i.N2}$	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	±	±
$U_{0.N2}$	±	±	±	±	±	±	+	±	+	+	±	±
Возможность использования системы защиты	+*	+*	+*	+*	+	+	+	+	+	+	+*	+*
	Аварийный режим											

Окончание таблицы 2.14

Возможность использования параметра	Номера режимов работы электрической сети										
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
$U_{\Phi i.N2}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	
$U_{0.N2}$	+	+	-	-	+	±	-	±	+	+	
Возможность использования системы защиты	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	
	Аварийный режим								НР		

+\* означает, что режим может быть выявлен при наличии несимметрии нагрузки в сети (в воздушных линиях напряжением 380 В несимметрия нагрузки является характерным признаком)

8. При трёхфазном коротком замыкании между фазами (режим 28) напряжения на всех фазах будут равны нулю – проставляем «+».

9. При однофазном коротком замыкании за оборванным нулевым проводом (режим 29) на повреждённой фазе напряжение будет равно нулю – проставляем «+».

10. Режимы с 30-го по 32-й связаны с разными видами коротких замыканий в конце параллельной линии и напряжения на всех фазах будут больше уставки – проставляем «←».

11. Режимы 33-й и 34-й относятся к нормальным, при которых напряжения на всех фазах будут больше уставки – проставляем «+».

Аналогично рассмотрим соотношения предельно возможных максимальных и минимальных значений напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$  с напряжением второй максимальной уставки  $U_{уст2}$ . Результаты сведём в четвёртую строку таблицы 2.14:

1. В нормальном режиме работы воздушной линии при симметричной нагрузке напряжение  $U_0$  равно нулю (режим 1), а при различных вариантах несимметричной нагрузки напряжение нулевой последовательности  $U_0$  не превышает 37,5–38 В (режимы 2–6), меньше значения уставки  $U_{уст2} = 44$  В. Поэтому в четвёртую строку таблицы 2.14 в соответствующих колонках проставим «+», т.е. режим определяется верно.

2. Режимы с 7-го по 10-й относятся к аварийным в связи с обрывом фазного провода и наблюдается значительное смещение нейтрали и, соответственно, повышение напряжения нулевой последовательности  $U_{0,2}$ . При этом минимальные и максимальные значения напряжения нулевой последовательности  $U_{0,мин}$  оказываются больше значения уставки  $U_{уст2} = 44$  В. Следовательно, нужно говорить о чётком срабатывании критерия, а в соответствующих колонках проставим знак «+».

3. При одновременном обрыве сразу трёх фазных проводов (режим 11) все фазные напряжения  $U_{фi,N2}$  будут равны нулю, соответственно, напряжение нулевой последовательности  $U_{0,2}$  будет также отсутствовать, следовательно, критерий не будет работать – проставляем знак «←».

4. Режимы с 12-го по 18-й относятся к аварийным в связи с обрывом нулевого провода. Здесь предельное минимальное напряжение меньше уставки, а предельное максимальное напряжение больше уставки. Эти напряжения зависят от несимметрии нагрузок по фазам. Следовательно, при отсутствии несимметрии или

её малом значении критерий работать не будет, он сработает при значительной несимметрии. Здесь, нужно говорить о частичном срабатывании критерия, а в соответствующих колонках проставим знак «±».

5. При 19-м режиме минимальное и максимальное значения напряжения  $U_{0,2}$  будут больше значения уставки  $U_{уст2}$  – проставляем знак «+».

6. При 20-м режиме минимальные значения напряжения  $U_{0,2}$  меньше уставки  $U_{уст2}$ , а максимальные значения больше её – проставляем знак «±».

7. При 21-м и 22-м режимах минимальные и максимальные значения напряжения  $U_{0,2}$  больше уставки  $U_{уст2}$  – проставляем знак «+».

8. При 23-м и 24-м режимах минимальные значения напряжения  $U_{0,2}$  меньше уставки  $U_{уст2}$ , а максимальные значения больше её – проставляем знак «±».

Примечание. В реальной электрической сети всегда имеется несимметрия фазных нагрузок потребителей, поэтому критерий  $U_{0,2} > U_{уст2}$  будет практически выполняться всегда и, следовательно, в режимах 12–18 и 23, 24 система должна срабатывать.

9. При однофазном и двухфазном коротких замыканиях на нулевой провод (режимы 25 и 26) напряжение нулевой последовательности будет всегда больше уставки – проставляем знак «+».

10. При двух- и трёх- междуфазных коротких замыканиях (режимы 27 и 28) напряжение нулевой последовательности будет всегда меньше уставки – проставляем знак «-».

11. При однофазном коротком замыкании за оборванным нулевым проводом (режим 29) напряжение нулевой последовательности будет всегда больше уставки – проставляем знак «+».

12. При однофазном коротком замыкании в конце параллельной воздушной линии (режим 30) минимальное значение напряжения  $U_{0,2}$  меньше уставки  $U_{уст2}$ , а максимальное значение больше её – проставляем знак «±».

13. При двухфазном коротком замыкании на нулевой провод в конце параллельной воздушной линии (режим 31) напряжение нулевой последовательности будет всегда меньше уставки – проставляем знак «-».

14. При междуфазном коротком замыкании в конце параллельной линии (режим 32) минимальное значение напряжения  $U_0$  меньше уставки  $U_{уст2}$ , а максимальное значение больше её – проставляем знак «±».

15. При нормальном режиме работы сети и различных вариантах изменения нагрузок на параллельной линии (режимы 33 и 34) напряжение нулевой последовательности будет всегда меньше уставки – проставляем знак «+».

Система защиты от обрывов фазных и нулевого проводов построена таким образом, что, если хотя бы один критерий выполняется, то система должна определять правильно режим работы электрической сети:

1. Если в какой-либо колонке в 3-й и 4-й строках стоят два «+» или стоят «+» и «-»/«±», то система сработает правильно и, в 5-й строке будет стоять «+».

2. Если в 3-й и 4-й строках стоят два «-», то система не сможет распознать соответствующий режим и в 5-й строке нужно тоже поставить знак «-».

3. Если в 3-й и 4-й колонках стоят два знака «±», то система может распознать, а может и не распознать соответствующий режим.

Рассматривая 5-ю строку таблицы 2.14, видим:

1. Система защиты чётко распознаёт нормальные режимы (1–6 и 33, 34).

2. Система защиты чётко распознаёт режимы, связанные с обрывами фазных проводов (7–11, 21, 22).

3. Система защиты при определённом значении несимметрии фазных нагрузок распознаёт обрывы нулевого провода (режимы 12–16, 23, 24) – в таблице 2.14 эти режимы помечены знаком «+\*».

4. Одновременные обрывы нулевого и одного и двух фазных проводов (режимы 17–20) система защиты распознаёт чётко.

5. Система защиты чётко распознаёт режимы, связанные с короткими замыканиями фаз на нулевой провод (25, 26, 28, 29), кроме междуфазного короткого замыкания (режим 27).

6. Система не может распознать короткие замыкания в конце параллельной воздушной линии (режимы 30–32).

## 2.5 Выводы

1. Для определения структуры системы выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий электрической сети напряжением 380 В нужно, с одной стороны, знать параметры электрической сети (напряжения и токи) при аварийных режимах её работы, на которые они должны реагировать, а с другой стороны, параметры нормальных режимов работы электрической сети, от которых следует отстраиваться.

2. В результате анализа режимов работы электрической сети напряжением 380 В, описанных в технической литературы, опыта эксплуатации и анализа принципиальной электрической схемы сети и возможных состояний её элементов определены 34 характерных подрежима, которые могут оказывать существенное влияние на напряжения и токи электрической сети.

3. Среди факторов, определяющих режимы работы электрической сети, рассмотрены:

3.1. Состояния четырёхпроводной воздушной линии, питающей потребителей, среди которых определены: нормальный режим работы; разные сочетания обрывов фазных и нулевого проводов с их падением на землю и без них; различные варианты коротких замыканий в линии.

3.2. Пофазное симметричное и несимметричное изменение электрической нагрузки потребителей.

3.3. Состояния фазных автоматических выключателей, устанавливаемых на вводе потребителя.

3.4. Изменение сопротивлений заземляющих устройств потребителя и трансформаторной подстанции, сопротивлений повторных заземлений нулевого провода воздушной линии.

3.5. Различного рода повреждения, возникающие в параллельных воздушных линиях, питающихся от одного трансформатора, – главным образом различного вида короткие замыкания.

4. Установленные диапазоны изменения напряжений электрической сети напряжением 380 В позволили предложить логические признаки различных режимов работы ВЛ-380 В.

5. На основании этих признаков предлагается дополнить применяемые в настоящее время в электрических сетях напряжением 380 В микропроцессорные счётчики определёнными функциями, позволяющими выявлять обрывы фазных и нулевого проводов ВЛ-380 В.

### 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В

Развитие «интеллектуальных электросетей» (Smart Grid) – это поистине революционные перемены, затрагивающие сегодня различные аспекты, связанные с выработкой, хранением, использованием и оплатой электроэнергии. Интеллектуальная электросеть – это новая система взглядов на роль технологий в обновлении энергетической инфраструктуры, в переосмыслении нашей ответственности как потребителей энергии и, в конечном итоге, в деле сбережения жизненно необходимых энергоресурсов [31].

В состав понятия «интеллектуальные электросети» входят расширяющее его понятие «интеллектуальные измерения» (Smart Metering – «интеллектуальный учёт» электроэнергии) [54]. «Интеллектуальные измерения» включают в себя учёт электрической энергии у потребителей, передачу информации в центры её обработки, «управление электропотреблением», под которым подразумевается ограничение и отключение неплательщиков с помощью различного рода коммутационных аппаратов, и ряд других специфических энергосбытовых функций.

#### **3.1 Анализ характеристик микропроцессорных счётчиков электрической энергии для оценки возможности выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В**

Основными признаками Smart Metering современных микропроцессорных счетчиков электрической энергии являются [52]:

1. Новшества, касающиеся в меньшей степени принципа измерений электрической энергии, а в большей – расширения функциональных возможностей приборов.
2. Дополнительными функциями выступают, как правило, измерение напряжений, токов, коэффициента мощности, времени, даты и длительности провалов и отсутствия питающего напряжения и т.д.

3. Счетчики имеют самодиагностику и защиту от распространенных методов хищения электроэнергии.

4. Наличие функций для управления нагрузкой и подачи команд на включение и отключение электрических приборов.

5. Более удобные и прозрачные функции для потребителей и энергоснабжающих организаций, позволяющие выбирать вид тарифа и энергосбытовую компанию в зависимости от потребностей в энергии и возможности ее своевременно оплачивать.

6. Интеграция измерений и учета всех энергоресурсов в доме для выработки решений, минимизирующих расходы на оплату энергоресурсов. В эту стратегию вовлекаются как отдельные потребители, так и управляющие компаниями домами, энергоснабжающие и сетевые компании.

Сегодня передовые метрологические решения строятся на основе, так называемой, система на кристалле. Однокристалльные решения позволяют получать многофункциональные средства учёта электроэнергии и дают возможность перепрограммирования в условиях эксплуатации. Применение микропроцессорных счётчиков позволило организовать передачу по самым разным каналам современной связи [54].

Счётчики электрической энергии устанавливаются, как правило, по периферии питающей электрической сети и получают информацию по приходящим к ним проводникам, в частности, по четырёхпроводной воздушной линии напряжением 380 В. На примере наиболее распространённых типов микропроцессорных счётчиков электрической энергии рассмотрим те характеристики, которые можно использовать в устройствах выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В.

**Микропроцессорные счётчики АЛЬФА.** Основная идея, заложенная при создании счетчика АЛЬФА – это цифровое измерение токов и напряжений. Специально разработанный измерительный микропроцессор вычисляет значения напряжения и тока, а затем информация уже в оцифрованном виде передается через интерфейсы на компьютер, либо через оптический порт, либо по имеющимся ка-

налам связи на расстояния. Счетчик не имеет движущихся частей. Существует возможность значительного расширения функций за счет установки дополнительных электронных плат [48].

Кроме основных функций по измерению активной и реактивной энергии счётчики АЛЬФА:

- измеряют (вычисляют) фазные напряжения и токи, фазные углы между ними, частоту сети, коэффициент мощности и т.д.;
- определяют до 46 величин, характеризующих показатели качества электрической энергии;
- контролируют с помощью модуля «Пороги» выход напряжений и токов за определённые максимальные или минимальные значения и сигнализируют о возникающих отклонениях;
- передают результаты измерений по цифровым и импульсным каналам связи.

**Микропроцессорные счётчики СЭТ-4.** Счетчики СЭТ-4ТМ.03М имеют примерно аналогичные функциональные возможности и предназначены для работы, как автономно, так и в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) и в составе автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ). Для передачи информации используются каналы связи GSM. Счетчики СЭТ-4ТМ.03М ведут журналы событий, журналы показателей качества электричества, журналы превышения порога мощности и статусный журнал. Счетчики позволяют производить программирование, перепрограммирование, управление и считывание параметров [86].

**Микропроцессорные счетчики Матрица.** Счётчики электроэнергии NP5 представляют собой интеллектуальные микропроцессорные многофункциональные приборы, предназначенные для контроля и учёта потребляемой электроэнергии [85].

В счётчиках происходит преобразование аналоговых сигналов датчиков тока и напряжения в цифровые величины, на основании которых вычисляется мощность, потребляемая энергия и ряд других параметров. Все данные сохраняются в энергонезависимой памяти счётчиков и могут быть дистанционно считаны.

Для счётчиков Матрица отметим следующие характеристики:

– В качестве линии связи со счётчиком используется силовая питающая линия, в которой счётчик установлен. Благодаря технологии ретрансляции сигнала каждым устройством и использованию двухчастотного канала передачи обеспечивается надежная устойчивая связь.

– Наличие системы контроля текущих параметров сети и встроенного управляемого силового реле. Данная особенность позволяет контролировать нагрузку в соответствии с договором с абонентом, производить дистанционные отключения в случае несоблюдения условий договора. Имеется возможность контроля загрузки линий и загруженность оборудования в часы пиковых нагрузок.

– Наличие в счетчиках датчика дифференциального тока, измеряющего разность токов в фазных и нулевом проводах сети потребителя. Наличие дифференциального тока может свидетельствовать о случайном или умышленном, полном или частичном заземлении нулевого провода. В любом случае, поставщик электроэнергии имеет возможность зафиксировать наличие этого тока и принять меры, исходя из соображений безопасности или борьбы с хищениями электроэнергии. В совокупности с силовым реле выступает как эффективное защитное устройство от различных аварийных режимов и несанкционированных отборов электроэнергии (хищения).

– Счётчики оснащены реле двух типов: основного и дополнительного. Основное реле обеспечивает полное отключение потребителя от сети при оговоренных условиях – при превышении лимита потребления активной мощности, лимита тока потребления по любой из фаз, лимита дифференциального тока и др.

**Микропроцессорные счетчики Энергомера.** Счетчики электроэнергии СЕ 303 производства ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера» наряду с перечисленными общими функциями обладают разнообразными программно-аппаратными опциями, например, возможностью подключения резервного источника питания, телеметрический вход и выход, реле сигнализации и управления нагрузкой. Системы, построенные на базе этих решений, используются для автоматизации контроля, коммерческого и технического учета электроэнергии и мощ-

ности на энергетических объектах, промышленных предприятиях, в энергосбытовых компаниях, в коммунальном и бытовом секторе, а также для создания многоуровневых систем контроля и учета электроэнергии и мощности в энергосистемах. Для двунаправленного обмена информацией об энергопотреблении в точке учета используются различные каналы связи: PLS, радио, GSM и другие [6, 83, 84].

Для реализации функций сигнализации и управления электропотреблением в счетчиках предусмотрены реле сигнализации РС (для управления устройствами сигнализации, реле управления РУ (для управления устройствами коммутации нагрузки), реле управления нагрузкой трехфазное РУН (для прямой коммутации нагрузки). На рисунке 3.1,а приведена схема подключения РС и РУ для счётчика исполнения CE303 S31, а на рисунке 3.1,б –схема подключения РУН для счётчика исполнения CE 303 S34.

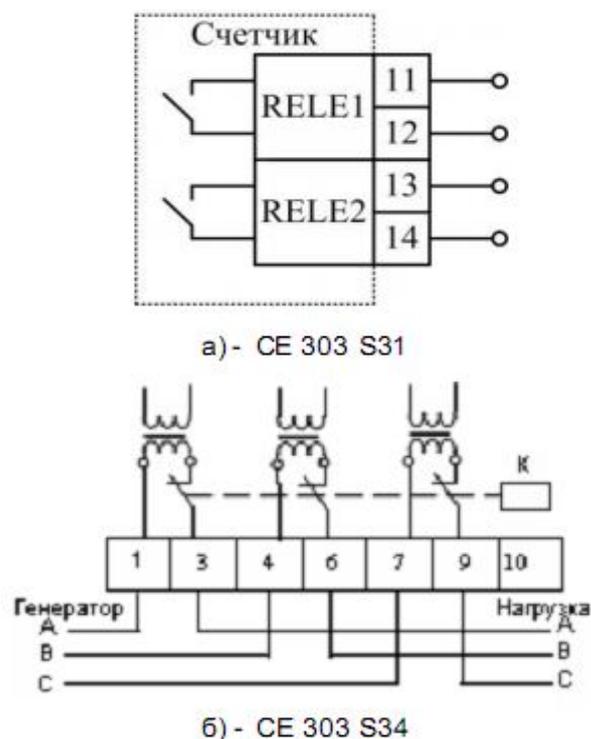


Рисунок 3.1 – Схема подключения реле: а – для счетчика CE303 S31;  
б – для счетчика CE303 S34

Проведённый анализ функций и характеристик микропроцессорных счётчиков электрической энергии показывает:

1. Счётчики, измеряя входные напряжения и токи, кроме основных расчётных параметров, связанных с электрической энергией, могут выполнять широкий круг дополнительных расчётов, в частности, определять параметры качества электрической.

2. Особенностью современных счётчиков является и то, что, например, при отклонении напряжения в питающей сети свыше допустимых максимального или минимального значений, они могут отключать потребители от сети.

3. Современные микропроцессорные системы учёта электрической энергии позволяют передавать информацию о потребляемой энергии сначала в питающую трансформаторную подстанцию, а затем в более высокие уровни или центры сбора и учёта данных – пусть сегодня один раз в сутки. Передача информации может осуществляться с использованием радио-, PLC-, GSM-технологий.

Подводя итоги сказанного, можно сделать вывод, что если микропроцессорный счётчик наделить дополнительными функциями, позволяющими определять состояние электрической сети, а используя каналы передачи данных, передать отключающую команду повреждённой воздушной линии на трансформаторную подстанцию, то в принципе можно построить систему защиты воздушной линии при обрывах фазных и нулевого проводов.

### **3.2 Обзор методов передачи информации от микропроцессорных счётчиков электроэнергии до центров сбора и учёта данных**

Обычная проводная телефонная связь сегодня уже не удовлетворяет всё возрастающим техническим требованиям. Современные системы управления и мониторинга становятся более интеллектуальными и разветвленными, требуя большую пропускную способность различного рода каналов связи. В последнее время широкое распространение получают новые виды информационного обмена, основанные на проводных и беспроводных технологиях.

**Передача информации на базе PLC-технологий.** Неизменный интерес к средствам передачи информации по промышленным и бытовым электросетям

обусловлен, прежде всего, возрастающей потребностью в сравнительно недорогих средствах связи массового применения. Идея передачи данных по электрической сети появилась ещё в 1930-х гг. Первые системы передачи данных по линиям электросети, так называемые PLC-системы (Power Line Communication), появились более 70 лет назад. В конце XX столетия ряд компаний реализовал первые большие проекты в этой области. Достижения PLC-технологии обусловлены появлением соответствующей элементной базы, в том числе, сигнальных процессоров, с использованием которых были реализованы сложные способы модуляции сигнала, что и позволило, в конечном счете, увеличить достоверность передачи информации [53].

Электрические сети подразделяются на три класса: высоковольтные (110 кВ и более), линии среднего напряжения (6, 10, 35 кВ) и низковольтные (до 1000 В). Структура сетей электроснабжения и области применения PLC-технологии приведены на рисунке 3.2.

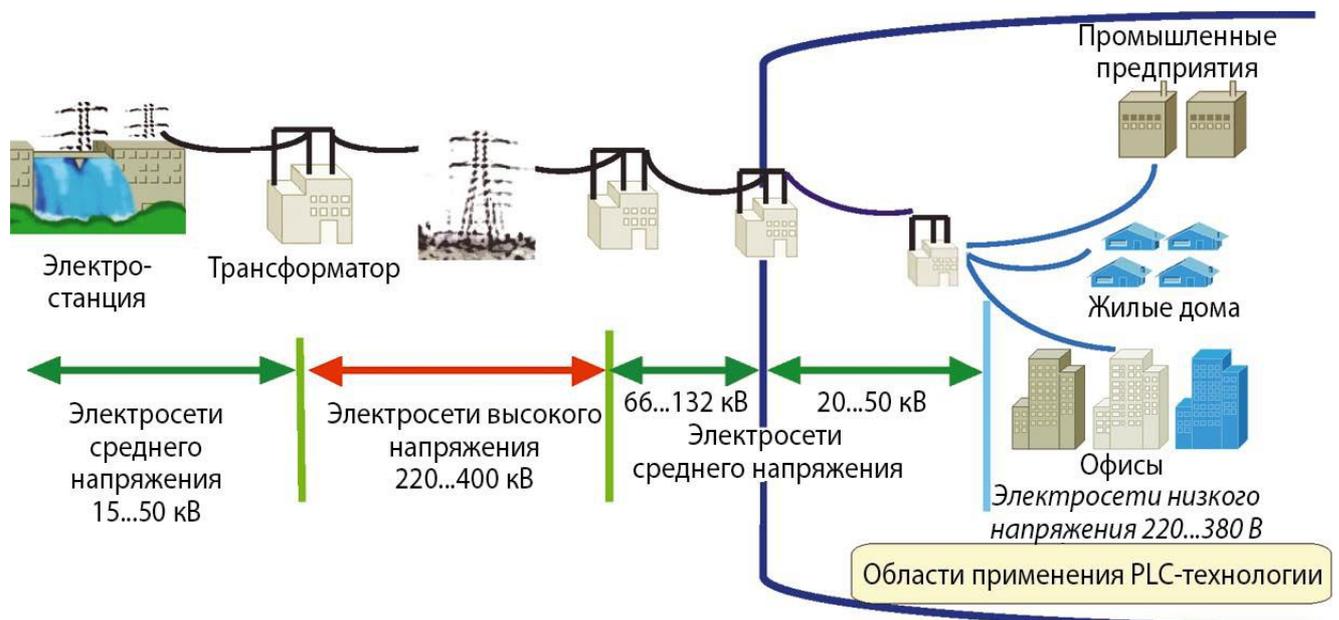


Рисунок 3.2 – Структура сетей электроснабжения и области применения PLC-технологии

В России использование PLC-технологий при построении автоматизированных информационно-измерительных систем контроля и учёта электрической энергии (АИИС КУЭ) особенно актуально и перспективно – ведь именно в нашей

стране самая высокая в мире протяженность низковольтных линий энергоснабжения. PLC-связь (или связь по низковольтной сети) осуществляется непосредственно по сетевым проводам напряжением 380 В (рисунок 3.3) [4, 6, 55].

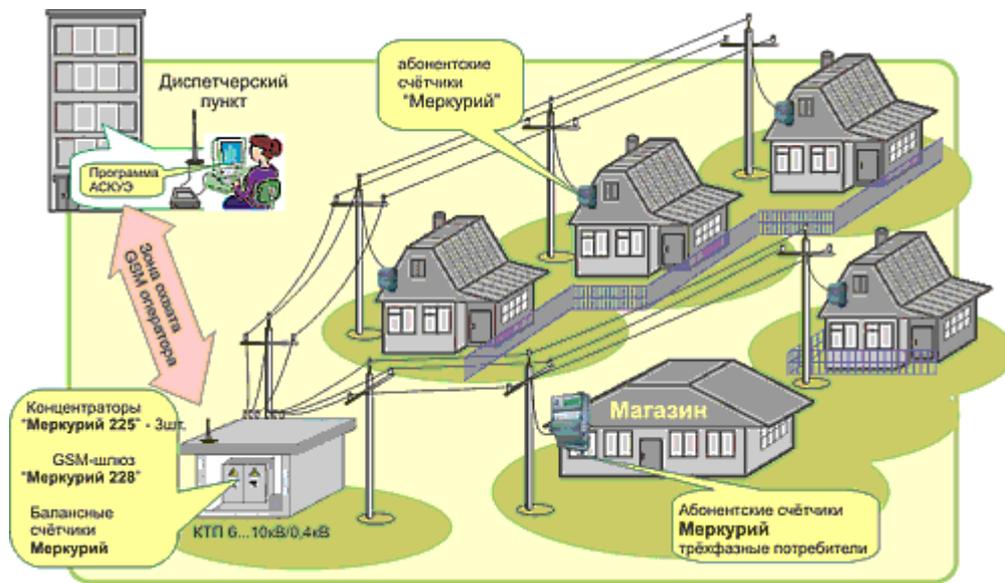


Рисунок 3.3 – Учёт отпуска электроэнергии в коттеджном посёлке

Рассмотрим на примере микропроцессорных счётчиков, выпускаемых ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», организацию передачи информации с использованием PLC-технологии [5, 6, 83, 84]. Техническими компонентами системы PLC являются (рисунок 3.4):

- трёхфазные и однофазные микропроцессорные счётчики электроэнергии;
- устройства организации удалённой связи – PLC-модем CE832, разветвители RS485, устройства сбора и передачи данных УСПД 164;
- GSM-модемы.

На рисунке 3.5 показана схема построения АСКУЭ коттеджного посёлка с использованием PLC-технологии. На вводе жилых зданий абонентов устанавливаются счётчики CE102 и CE303 (CE301) с встроенными PLC-модемами. При построении АСКУЭ многоквартирного дома данные счётчики устанавливаются в этажных (квартирных) щитах жилых зданий. Также при необходимости возможна организация внутридомового учёта путем установки в этажных (квартирных) щитах

однофазных многофункциональных счетчиков электрической энергии CE102 с встроенными PLC-модемами, имеющими класс точности 1,0 и трехфазных многотарифных приборов CE303 (CE301) для учета расходования электрической энергии на освещение мест общего пользования, эксплуатацию лифтовых систем.



Рисунок 3.4 – Технические компоненты системы PLC

Приборы учета электроэнергии объединяются в единый комплекс с устройством сбора и передачи данных УСПД 164-01М, расположенным в шкафу АСКУЭ в помещении трансформаторной подстанции. Связь между счётчиками и УСПД осуществляют модемы PLC CE832С3, CE832С4, предназначенные для передачи информации по низковольтным электрическим сетям переменного тока 380 В в цифровой форме. Модемы PLC имеют однофазное подключение к электрической сети напряжением 380 В и передают информацию по одному из фазных проводов и нулевому проводу. В помещении трансформаторной подстанции устанавливаются трехфазные многотарифные приборы учета CE303 (CE301), имеющие класс точности 0,5 (1,0) и обеспечивающие суммарный учет по каждой отходящей линии.

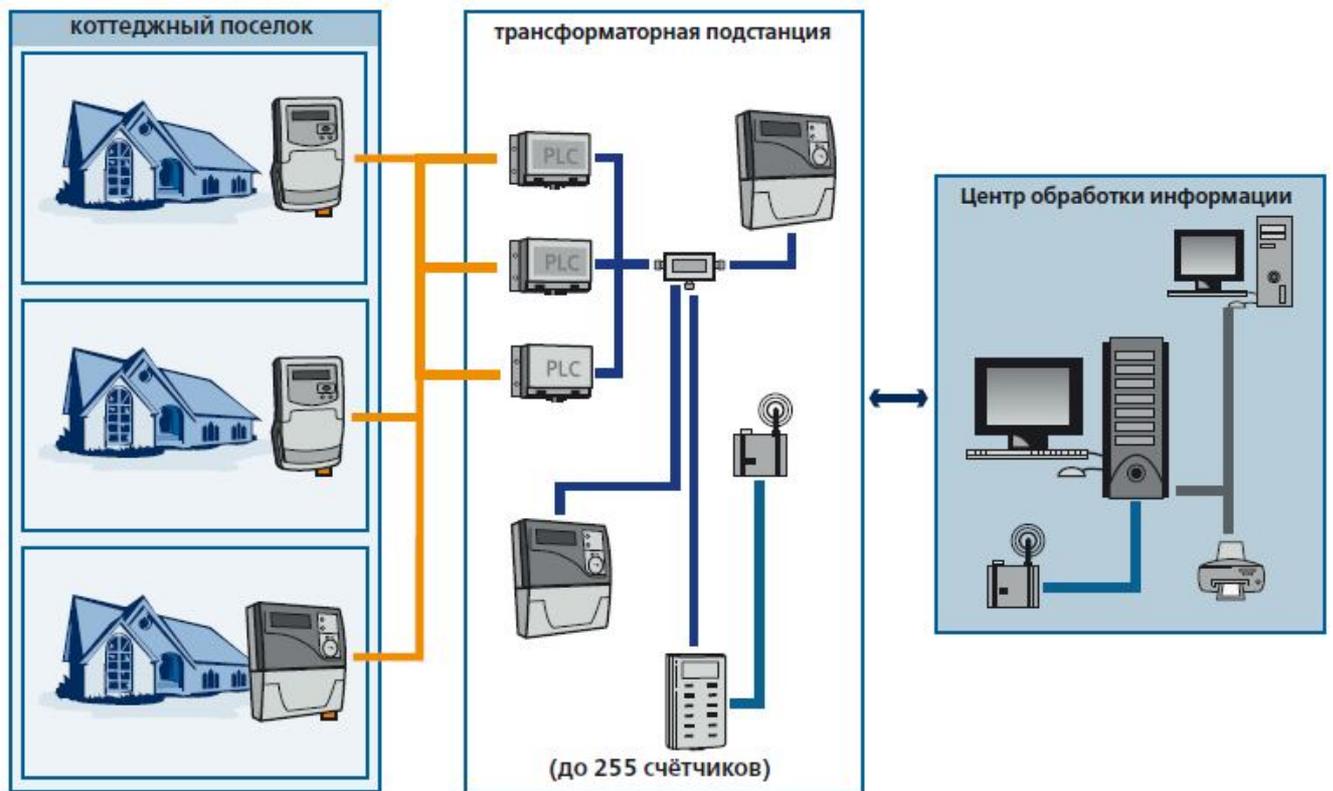


Рисунок 3.5 – Схема построения АСКУЭ коттеджного поселка с использованием PLC-технологии

УСПД 164-01М производит автоматический сбор информации с приборов учета, выполняет функцию синхронизации времени в подключенных счетчиках, а также обеспечивает Центру сбора и обработки информации (ЦСОИ) доступ к накопленным данным. В качестве каналов передачи информации в ЦСОИ возможно применение выделенных и коммутируемых телефонных линий, каналов связи стандарта GSM, а также локальной сети Ethernet.

Система передачи информации по PLC-связи позволяет в режиме реального времени считывать показания счетчиков, как с частных, так и с многоквартирных домов, включенных в АИИС КУЭ. При этом контролеру вовсе не требуется доступ в помещение – необходимая информация автоматически или по запросу передается на необходимый уровень АИИС КУЭ, размещенный в энергосбытовой компании. Наряду с целым рядом существенных преимуществ PLC-технология имеет определённые проблемы. В частности, при обрыве проводов или потере

контактов прекращается связь между счётчиками и устройствами УСПД, т.е. нарушается работа автоматизированной системы учёта электрической энергии.

**Передача информации на базе GSM-технологий.** Global System for Mobile Communication (GSM) – глобальная система подвижной связи; европейский цифровой стандарт; диапазон частот 890–960 МГц и 1710–1880 МГц.

Первая GSM система, состоящая из одного шестиканального передатчика, была создана в североамериканском городе Сент-Луисе еще в 1946 году. Активное же внедрение сотовой связи началось значительно позже – первые коммерческие системы появились в Америке в 1979 году, а приобрели национальный масштаб только в 1983 году. В Европе в 1981 году появилась первая международная система, объединившая Норвегию, Данию, Швецию и Финляндию. В качестве стандарта была принята цифровая система компании Mannesmann, внедренная в 1991 г. в Германии. Сегодня стандарт GSM и его версии приняты к использованию приблизительно в 80 странах мира [4, 52, 54, 83].

Принцип построения сотовых систем вкратце состоит в следующем: в пределах территории действия сети устанавливается некоторое количество относительно маломощных стационарных приемо-передающих станций (базовых станций), каждая из которых имеет небольшую зону действия (обычно несколько километров). При этом зоны действия соседних станций несколько перекрывают друг друга, чтобы обеспечить возможность перемещения абонента из одной зоны в другую без потери связи.

В мировой практике подобные системы имеют обозначение «AMR systems» (Automatic Meter Reading – система автоматического считывания показаний счетчиков). Почти все ведущие производители счетчиков много лет работали над созданием простых, надежных и дешевых систем для бытовых потребителей. При разработке таких систем соблюдались два основных подхода: система должна быть окупаемой и обеспечивать повышенную надежность функционирования. В настоящее время такие системы созданы, производятся серийно и широко внедряются во многих странах [87].

На рисунке 3.6 показано построение системы сбора и передачи информации об электропотреблении с использованием GSM-технологии. На вводе жилых зданий абонентов устанавливаются счетчики СЕ301 со встроенными GSM-модемами. При построении АСКУЭ многоквартирного дома данные счетчики устанавливаются в этажных (квартирных) щитах жилых зданий [6].

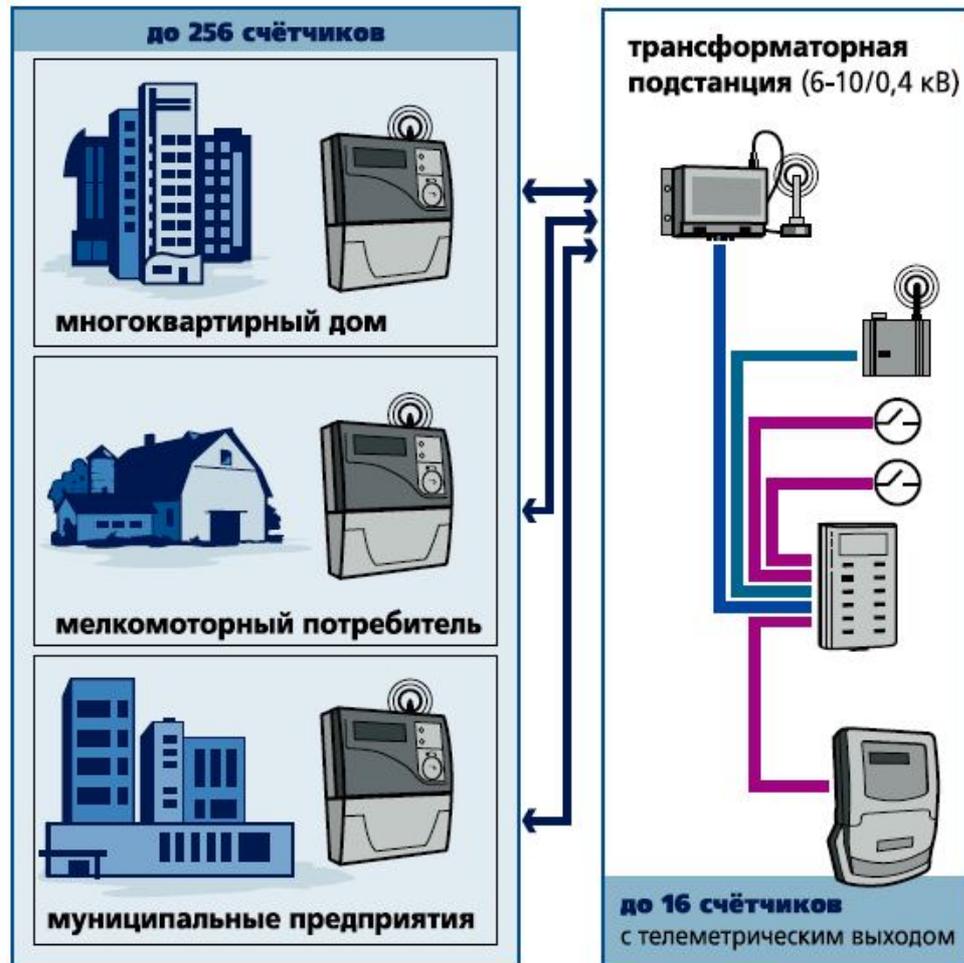


Рисунок 3.6 – Схема построения АСКУЭ потребителей с использованием GSM-технологии

Основой системы являются многофункциональные микропроцессорные счетчики, которые позволяют исключить из состава АСКУЭ дорогостоящие устройства сбора и передачи данных (УСПД), тем самым повысить надежность измерительного канала, поскольку вся учетная информация хранится в цифровом виде в приборах учета и по интерфейсным каналам транспортируется непосредственно в канал связи. В качестве интерфейса встроен модуль GSM, что позволяет уйти от

различного навесного оборудования и снизить вероятность хищения элементов системы, а также вторжения в нее. На контролируемом объекте находятся только счетчики. В качестве канала связи могут быть использованы GSM-каналы ведущих операторов сотовой связи, располагаемых на территории применения АСКУЭ.

**Спутниковые каналы передачи данных.** При разработке автоматизированной системы учёта электроэнергии часто сталкиваются с отсутствием каналов связи и значительными расстояниями между энергообъектами. Эта ситуация характерна для всех нефтедобывающих компаний. На рисунке 3.7 представлено географическое расположение подстанций, входящих в систему: расстояние между объектами – до 600–700 км [78]. 12 энергообъектов класса напряжений 220/110 кВ, по которым проходит граница балансовой принадлежности, относятся к «Томскэнерго», 1 энергообъект – к «Тюменьэнерго» и 1 принадлежит «Томскнефти». Разработчикам пришлось принимать во внимание, что у каждого из партнеров были свои организационные и технические требования к учету электроэнергии. Единственное техническое решение для сбора информации с наиболее удаленных объектов – это использование спутниковой связи. Только такой подход позволил внедрить АСКУЭ менее чем за год. Предпочтение было отдано Global Star – системе голосовой связи и передачи данных, использующей группировку из 48 низкоорбитальных спутников и обеспечивающей зону обслуживания от 70° северной до 70° южной широт.

Параметры, повлиявшие на выбор спутниковой системы связи Global Star:

- спутники в Global Star – это простые ретрансляторы без коммутации сигналов на борту, что существенно повышает надежность системы;
- спутники являются низкоорбитальными (на высоте 1410 км); благодаря этому задержки при передаче данных составляют менее 100 мс, что значительно меньше, чем при использовании среднеорбитальных и геостационарных спутников;

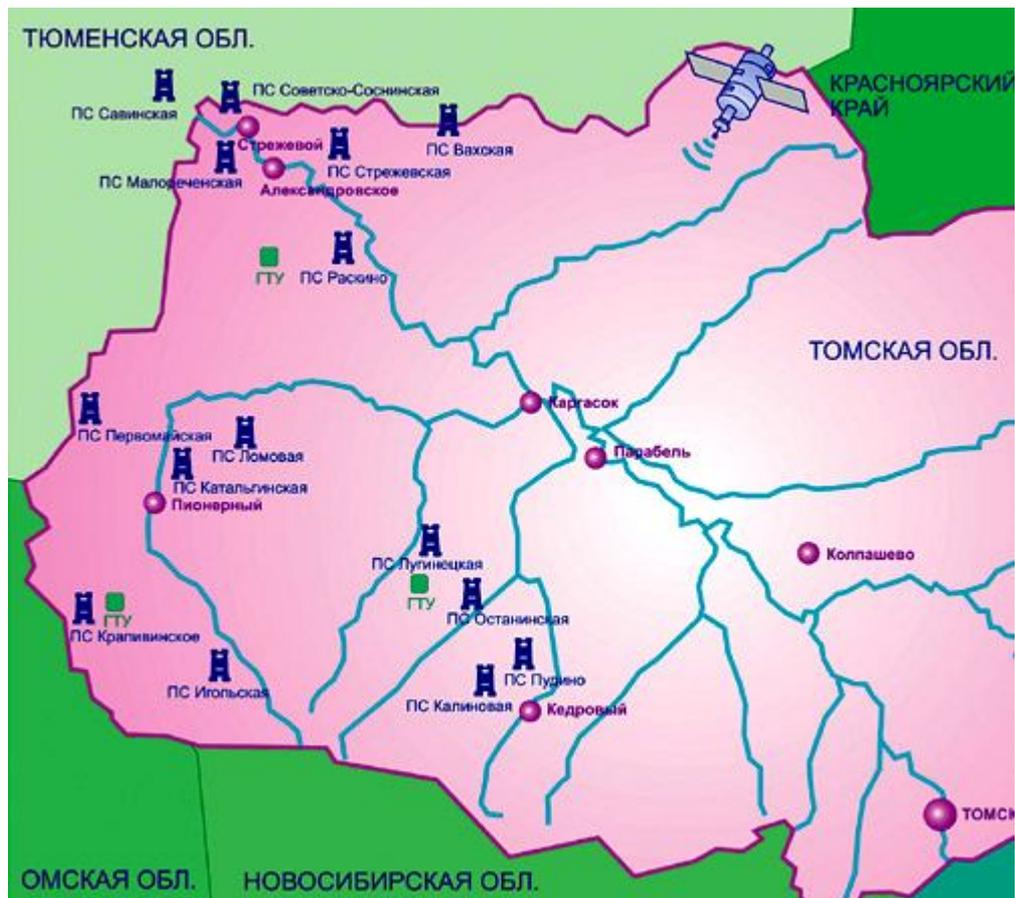


Рисунок 3.7 – Спутниковые каналы передачи данных

– система Global Star обеспечивает высокую надежность и качество передачи данных, а также имеет значительную емкость по сравнению с другими коммерческими системами спутниковой связи.

Передача данных. Центр сбора данных АСКУЭ находится в г. Стрежевом. Коммерческая информация от АСКУЭ передается в ЮКОС (Москва), «Томскэнерго» (Томск) и Нижневартовские электросети «Тюменьэнерго» (Нижневартовск). От АСКУЭ в ЮКОС информация передается по корпоративной ЛВС через спутниковый канал связи, в «Томскэнерго» и в «Тюменьэнерго» – по коммутируемой телефонной линии.

Из обзора методов передачи информации от микропроцессорных счётчиков электроэнергии до центров сбора и учёта данных можно сделать следующие выводы:

1. Для передачи информации в электрических сетях напряжением 380 В наиболее приемлемыми являются два варианта, основанные на использовании PLC- и GSM-технологий.

2. Передача информации по двум проводам воздушной линии с использованием PLC-технологий, с одной стороны, для эксплуатирующей организации экономически выгодна, т.к. на саму передачу команды не требуются дополнительных средств. Но, с другой стороны, обрыв одного из передающих проводов будет приводить к принципиальной невозможности работы системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии.

3. Передача информации по GSM-каналу, несмотря на дополнительные затраты на приобретение средств связи, отличается простотой технического решения. Кроме того, принципиально не должны тратиться средства на саму процедуру передачи команды отключающего сигнала.

В связи с изложенным, принято решение о выполнении канала связи с использованием GSM-технологии.

### **3.3 Разработка функциональной схемы системы защиты и дополнительных функций для микропроцессорного счётчика электроэнергии с целью выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В**

На основе обзора характеристик микропроцессорных счётчиков и возможных каналов передачи информации можно сделать следующие выводы:

1. Анализ функций микропроцессорных счётчиков электрической энергии показывает, что, измеряя входные напряжения и токи, они, кроме основных расчётных параметров, связанных с электрической энергией, могут выполнять широкий круг дополнительных расчётов, в частности, определять параметры качества электрической энергии.

2. Особенностью современных счётчиков является и то, что, например, при отклонении напряжения в питающей сети свыше допустимых максимального или минимального значений, они могут отключать потребители от сети.

3. Современные микропроцессорные системы учёта электрической энергии позволяют передавать информацию о потребляемой энергии сначала в питающую трансформаторную подстанцию, а затем в более высокие уровни или центры сбора и учёта данных – с периодичностью от одного раза в сутки до 1 раза в три минуты. Передача информации может осуществляться с использованием проводных цифровых, PLC-, радио- и GSM-технологий.

Подводя итоги сказанному, можно сделать общий вывод, что если микропроцессорный счётчик наделить дополнительными функциями, позволяющими определять состояние электрической сети, а используя каналы передачи данных, передать команду отключающего сигнала в трансформаторную подстанцию о повреждённой воздушной линии, то можно построить систему защиты воздушной линии от обрывов фазных и нулевого проводов [44].

Рассмотрим возможность использования трёхфазных микропроцессорных счётчиков электрической энергии для выявления обрывов фазных и нулевого проводов четырёхпроводной воздушной линии электрической сети напряжением 380 В и передачи команды отключающего сигнала от микропроцессорного счётчика в трансформаторную подстанцию на коммутационный аппарат, установленный в начале воздушной линии, для отключения воздушной линии с повреждением, на примере трёхфазного микропроцессорного счётчика активной и реактивной электрической энергии типа СЕ303, выпускаемого ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера» [5, 6, 83, 84].

На рисунке 3.8 показана функциональная схема системы защиты, построенной с использованием микропроцессорного счётчика и передачи команды отключающего сигнала в трансформаторную подстанцию по GSM-каналу. Здесь показаны: трансформаторная подстанция напряжением 10/0,4 кВ с силовым трансформатором Т, от которой по четырёхпроводной воздушной линии ВЛ-380 В питаются потребители электрической энергии; воздушная линия подключена к трансформа-

торной подстанции с помощью автоматического выключателя QF2; перед потребителями установлен трёхфазный счётчик электрической энергии; передача команды отключающего сигнала организована через канал передачи сотового оператора телефонной связи GSM; в трансформаторной подстанции установлена схема отключения выключателя QF2, обеспечивающая отключение автоматического выключателя QF2.

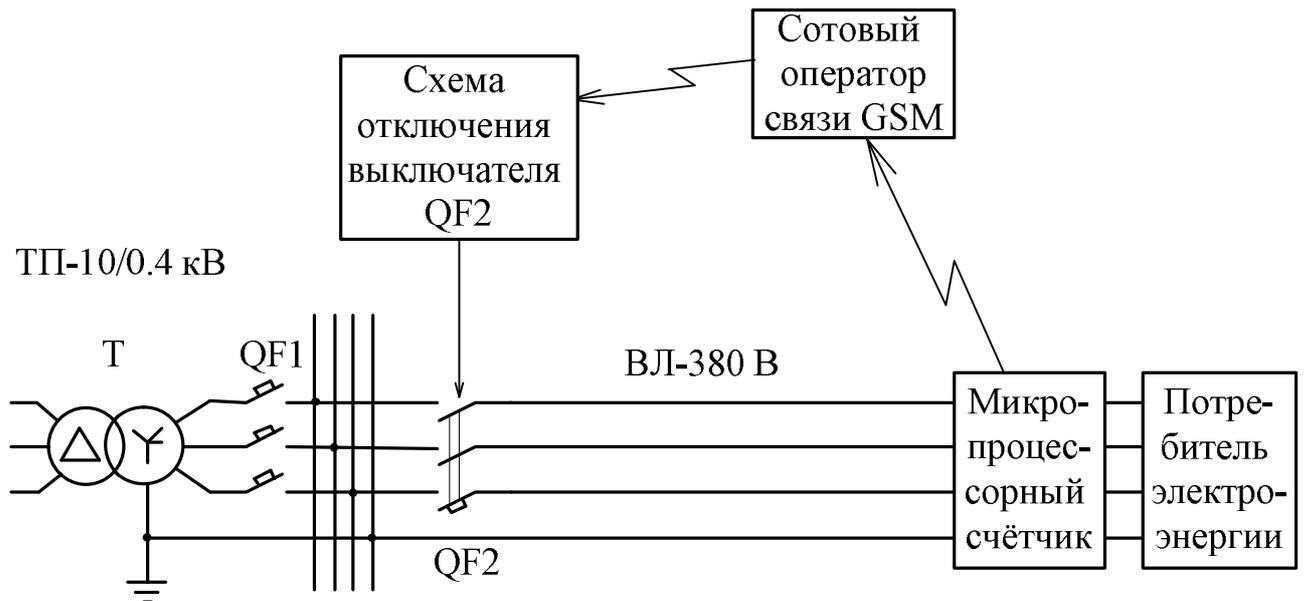


Рисунок 3.8 – Функциональная схема системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов

Микропроцессорный счётчик электрической энергии устанавливается на конечных участках ВЛ на вводе потребителя. При обрывах фазных и нулевого проводов формируется команда отключающего сигнала, которая по GSM-каналу передаётся на трансформаторную подстанцию, где автоматический выключатель QF2 обеспечивает отключение повреждённой воздушной линии.

Рассмотрим последовательно построение и функционирование элементов системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов.

Основной функцией микропроцессорного счётчика (рисунок 3.9) является измерение и учёт активной и реактивной энергии, потребляемой потребителем. Для передачи данных о потребляемой энергии в счётчике предусмотрен GSM-модем.



Рисунок 3.9 – Структурная схема микропроцессорного счётчика электрической энергии

Для выполнения микропроцессорным счётчиком возможности защиты воздушной линии он дополнен рядом функций, которые позволяют выявлять обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии, организовать формирование и передачу команды отключающего сигнала по GSM-каналу в трансформаторную подстанцию для отключения автоматического выключателя, установленного в начале воздушной линии.

Выполняя основные функции, микропроцессорный счётчик электрической энергии, производит обработку информации о напряжениях фаз относительно нулевого провода и токов, протекающих по фазным проводам. При этом формируется информация о трёх фазных напряжениях  $\underline{U}_{AN}$ ,  $\underline{U}_{BN}$ ,  $\underline{U}_{CN}$  электрической сети относительно нулевого провода.

В результате анализа изменений напряжений фаз сети относительно нулевого провода на вводе потребителя можно выявлять и фиксировать три состояния электрической сети:

- нормальный режим работы;
- обрыв фазного провода;

– обрыв нулевого провода.

В измерительно-логическом блоке микропроцессорного счётчика предложено внести следующие дополнительные функции:

1. Сравнение напряжений всех трёх фаз относительно нулевого провода с заданной минимальной уставкой по напряжению  $U_{\Phi_i, N2} \leq U_{уст.1}$ . Снижение напряжения  $U_{\Phi_i, N2}$  любой из фаз ниже уровня минимальной уставки является признаком обрыва фазного провода.

2. Сравнение напряжения несимметрии с другой заданной максимальной уставкой по напряжению  $U_{НС} \geq U_{уст.2}$ . Повышение напряжения  $U_{НС}$  выше уровня максимальной уставки является признаком обрыва нулевого провода.

3. Формирование логического сигнала (команды отключающего сигнала) о возникновении аварийного режима работы воздушной линии – обрыве фазного или нулевого проводов.

***Примечания.***

1. При построении системы защиты использовано напряжение несимметрии  $U_{НС}$  трёхфазной системы напряжений относительно нулевого провода, которое связано с напряжением нулевой последовательности соотношением  $U_{НС} = 3 \cdot U_0$ . Напряжение  $U_0$  ранее рассматривалось в работе при исследовании режимов работы электрической сети напряжением 380 В.

2. При нормальном режиме работы электрической сети значения напряжений фаз относительно нулевого провода близки к номинальным значениям, а напряжение нулевой последовательности  $U_0$  даже при предельных вариантах несимметрии фазных нагрузок потребителя (отсутствие нагрузки на одной или сразу на двух фазах) не превышает 17 %  $U_{\Phi}$ , а напряжение несимметрии  $U_{НС}$ , соответственно, 51 %  $U_{\Phi}$  (см. раздел 2.3) От этого напряжения нужно отстраивать систему защиты при нормальном режиме работы электрической сети – обеспечивается выбором максимальной уставки  $U_{уст2} = 0,6 \cdot U_{\Phi}$ .

3. При обрыве фазного или нулевого провода возникает аварийная ситуация на четырёхпроводной воздушной линии, опасная как для электрооборудования элек-

трической сети, потребителей электрической энергии, так и для людей и животных, находящихся вблизи оборванных проводов:

– при обрыве фазного провода напряжение на фазе относительно нулевого провода за местом повреждения (со стороны потребителя – на входе микропроцессорного счётчика) становится близким к нулевому значению. С учётом возможных напряжений на оборванном фазном проводе со стороны потребителя (до 10 %  $U_{\Phi}$ ), возникающих при определённых режимах работы электрической сети, минимальная уставка системы защиты принята  $U_{уст1} = 0,15 \cdot U_{\Phi}$ ;

– при обрыве нулевого провода напряжения на участке электрической сети за местом повреждения (со стороны потребителя – на входе микропроцессорного счётчика) зависят от симметрии фазных нагрузок потребителя и, как показали выполненные нами ранее исследования, их значения могут находиться в пределах

- при изменении нагрузки на одной фазе

$$0 \leq U_{НС} \leq 1,5 \cdot U_{\Phi} \quad \text{и} \quad \begin{cases} 1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i.N2} \geq 1,5 \cdot U_{\Phi}; \\ 1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i.N2} \geq 0,866 \cdot U_{\Phi}; \end{cases} \quad (3.1)$$

- при изменении нагрузки на двух фазах

$$0 \leq U_{НС} \leq 3,0 \cdot U_{\Phi} \quad \text{и} \quad \begin{cases} 1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i.N2} \geq 1,732 \cdot U_{\Phi} = U_{Л}; \\ 1,0 \cdot U_{\Phi} \geq U_{\Phi i.N2} \geq 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Выбор максимальной уставки  $U_{уст2} = 0,6 \cdot U_{\Phi}$  означает, что система защиты будет выявлять обрыв нулевого провода в том случае, если напряжение несимметрии превысит значение  $U_{НС} > 0,6 \cdot U_{\Phi}$ , то есть при наличии определённой несимметрии фазных нагрузок потребителей, которая характерна при питании однофазных электроприёмников. Это отмечено в примечании к табл. 2.14 и относится к режимам 12–16, 23, 24, которые возникают при обрыве нулевого провода воздушной линии.

4. Логика изменений напряжений фаз относительно нулевого провода и напряжения несимметрии и была использована нами для выявления обрывов соответственно фазных и нулевого проводов.

На рисунке 3.10,а приведена функциональная схема блока дополнительных функций микропроцессорного счётчика. Здесь обозначено: ПН<sub>А</sub>, ПН<sub>В</sub>, ПН<sub>С</sub> – преобразователи переменного напряжения в логический сигнал  $\bar{F}$  или  $F$  с минимальной уставкой по напряжению  $U_{уст1}$ ; С – сумматор напряжений; ПН<sub>Н</sub> – преобразователь переменного напряжения в логический сигнал  $\bar{N}$  или  $N$  с максимальной уставкой по напряжению  $U_{уст2}$ ; И<sub>А</sub>, И<sub>В</sub>, И<sub>С</sub>, И<sub>1</sub> – логические элементы И; ИЛИ<sub>1</sub>, ИЛИ<sub>2</sub> – логические элементы ИЛИ. На рисунке 3.10,б показана стилизованная диаграмма напряжений блока дополнительных функций работы при различных состояниях электрической сети.

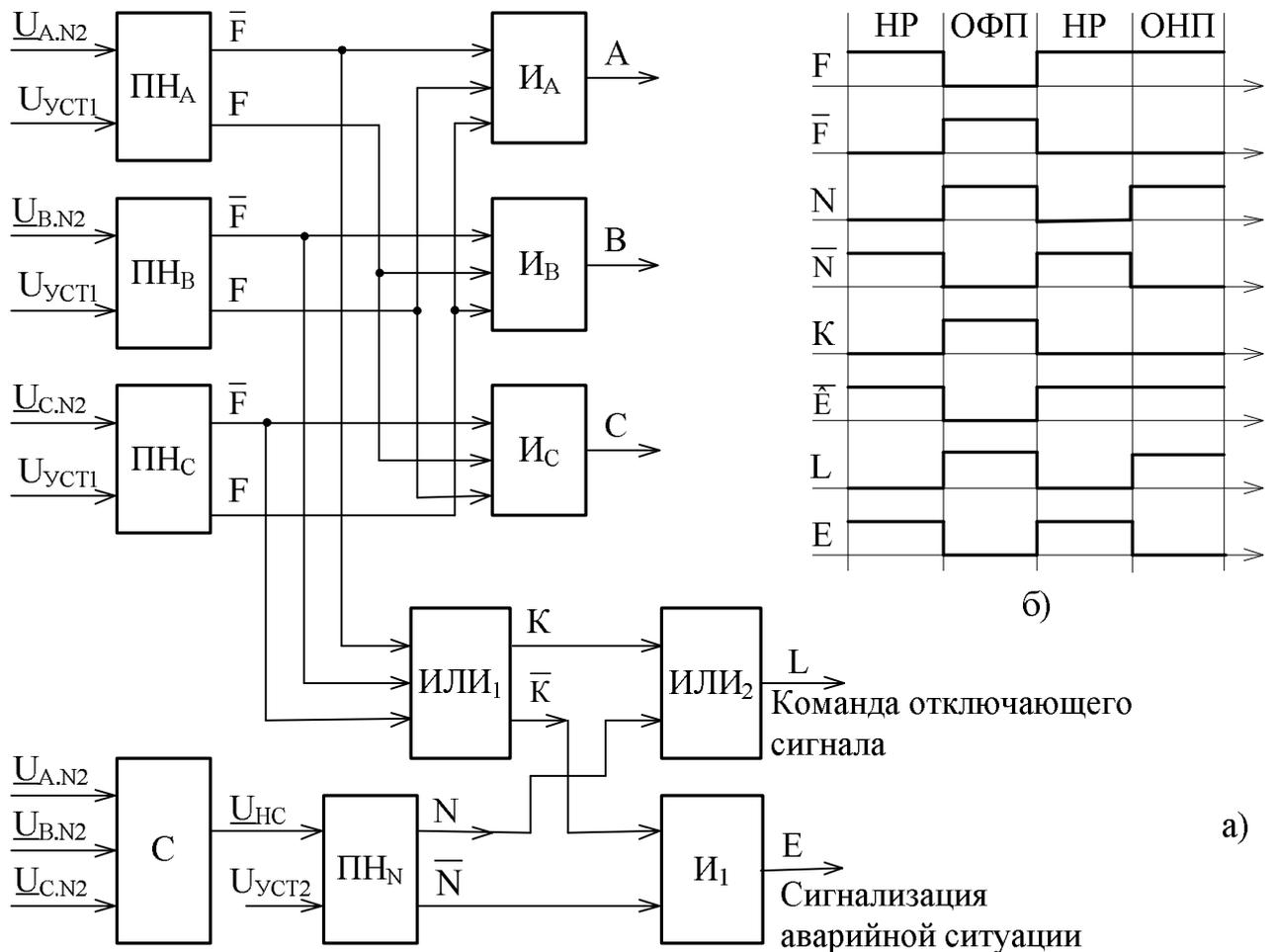


Рисунок 3.10 – Функциональная схема блока дополнительных функций микропроцессорного счётчика (а) и стилизованная диаграмма напряжений (б)

Напряжения фаз сети относительно нулевого провода  $\underline{U}_{A.N2}$ ,  $\underline{U}_{B.N2}$ ,  $\underline{U}_{C.N2}$  подаются на входы трех преобразователей ПН<sub>А</sub>, ПН<sub>В</sub>, ПН<sub>С</sub> и входы сумматора С. В результате векторного суммирования трех напряжений на выходе сумматора С получается напряжение несимметрии  $\underline{U}_{НС}$  трёхфазной системы напряжений относительно нулевого провода на вводе потребителя.

Преобразователи ПН<sub>А</sub>, ПН<sub>В</sub>, ПН<sub>С</sub> имеют минимальную уставку по напряжению  $U_{уст1} = 0,15 \cdot U_{\Phi}$ , которая обеспечивает изменение выходного сигнала F с логической единицы на логический нуль одного из преобразователей ПН<sub>і</sub> только при обрыве фазного провода и соответствующем понижении напряжения на фазе  $U_{\Phi i}$  относительно нулевого провода.

Преобразователь ПН<sub>Н</sub> имеет максимальную уставку по напряжению  $0,6 \cdot U_{\Phi}$  и его выходной сигнал N изменяется с логического нуля на логическую единицу при обрыве нулевого провода и повышении напряжения несимметрии  $U_{НС}$ .

Сигналы  $\bar{F}$  с инверсных выходов преобразователей ПН<sub>А</sub>, ПН<sub>В</sub>, ПН<sub>С</sub> подаются на первые входы логических элементов И одноименных фаз (соответственно И<sub>А</sub>, И<sub>В</sub>, И<sub>С</sub>, рисунок 3.10,а) и на входы логического элемента ИЛИ<sub>1</sub>, а сигналы F с неинверсных выходов преобразователей – на логические элементы И отстающей и опережающей фаз. Такая схема соединений в нормальном режиме работы электрической сети обеспечивает запрет для логических элементов И от преобразователей одноименных фаз, а при возникновении обрыва фазного провода и понижении напряжения на фазе – разрешение для логического элемента И поврежденной фазы и подтверждение запрета для логических элементов И здоровых фаз. Логические элементы И<sub>А</sub>, И<sub>В</sub>, И<sub>С</sub> позволяют определять фазу, в которой произошёл обрыв провода. Выходной сигнал К (рисунок 3.10,б) логического элемента ИЛИ<sub>1</sub> в нормальном режиме равен логическому нулю, а при возникновении обрыва провода на любой из фаз ВЛ становится равным логической единице.

Полученные сигналы  $K$ ,  $\bar{K}$ ,  $N$ ,  $\bar{N}$  позволяют идентифицировать различные состояния воздушной линии (рисунок 3.10,б):

1 Сигнал К на выходе логического элемента ИЛИ<sub>1</sub> равен логической единице при обрыве любого фазного провода.

2 Сигнал  $N$  на выходе преобразователя напряжения  $ПН_N$  равен логической единице при обрыве нулевого провода.

3 Сигнал  $L$  на выходе логического элемента ИЛИ<sub>2</sub> равен логической единице как при обрыве фазных так и нулевого проводов и может быть использован для формирования команды отключения ВЛ.

4 Сигналы  $\bar{K}$  и  $\bar{N}$  с инверсных выходов логического элемента ИЛИ<sub>1</sub> и преобразователя напряжения  $ПН_N$  подаются на входы логического элемента И<sub>1</sub>. Его выходной сигнал  $E$  будет равен логической единице только при нормальном режиме работы воздушной линии.

5 С помощью логических элементов И<sub>A</sub>, И<sub>B</sub>, И<sub>C</sub> показывается фаза с оборванным проводом.

Функциональная схема может быть дополнена различного рода информационными блоками индикации как режимов работы электрической сети, так и указания вида повреждения.

На рисунке 3.11 приведена схема формирования, отправки и передачи команды отключающего сигнала. Микропроцессорный счётчик содержит последовательно соединённые блок дополнительных функций, блок преобразования логического сигнала в сигнал оператора связи и передающий GSM-модем, выход которого через канал передачи сотового оператора связи GSM связан с принимающим GSM-модемом схемы отключения выключателя QF2.

Блок дополнительных функций микропроцессорного счётчика при обрыве фазного или нулевого проводов ВЛ-380 В формирует логический сигнал  $L$  (команду отключающего сигнала), который преобразуется в сигнал оператора связи (организуется телефонный звонок). Передающий GSM-модем через сотовый оператор связи GSM обеспечивает дозвон до принимающего GSM-модема, находящегося в трансформаторной подстанции схемы отключения автоматического выключателя QF2.

На рисунке 3.12 приведена схема отключения выключателя QF2. Здесь обозначено: принимающий GSM-модем, например, модуль дистанционного управления типа RC-101 по сети GSM; БОВ – блок отключения выключателя; VD – сими-

стор; QF2 – автоматический выключатель типа Compact NSX производства компании Schneider Electric.

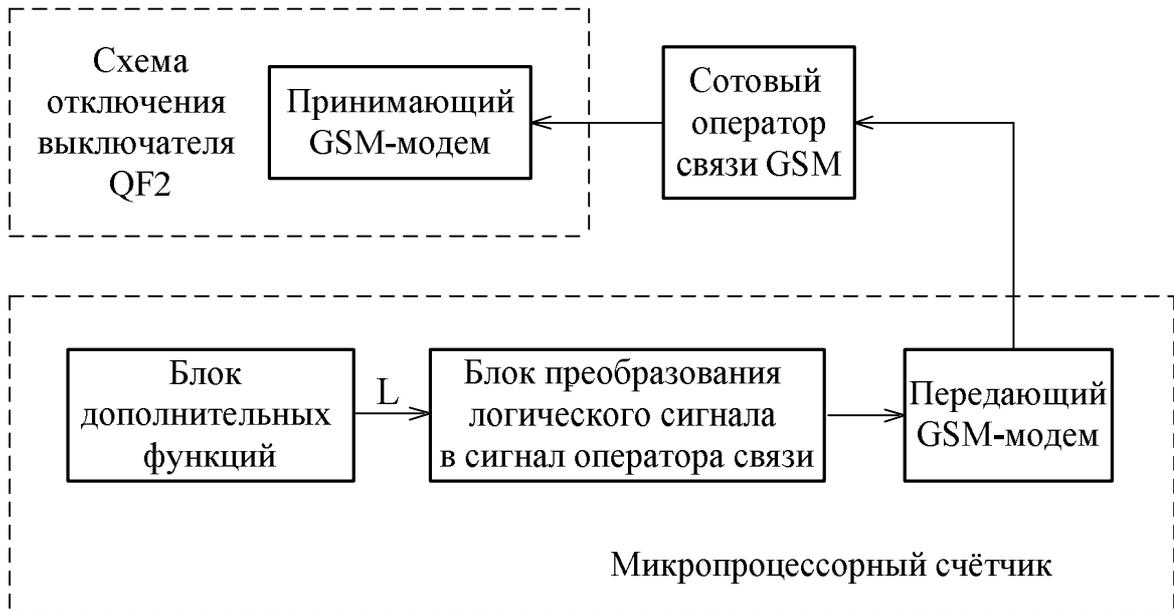


Рисунок 3.11 – Схема формирования, отправки и передачи команды отключающего сигнала

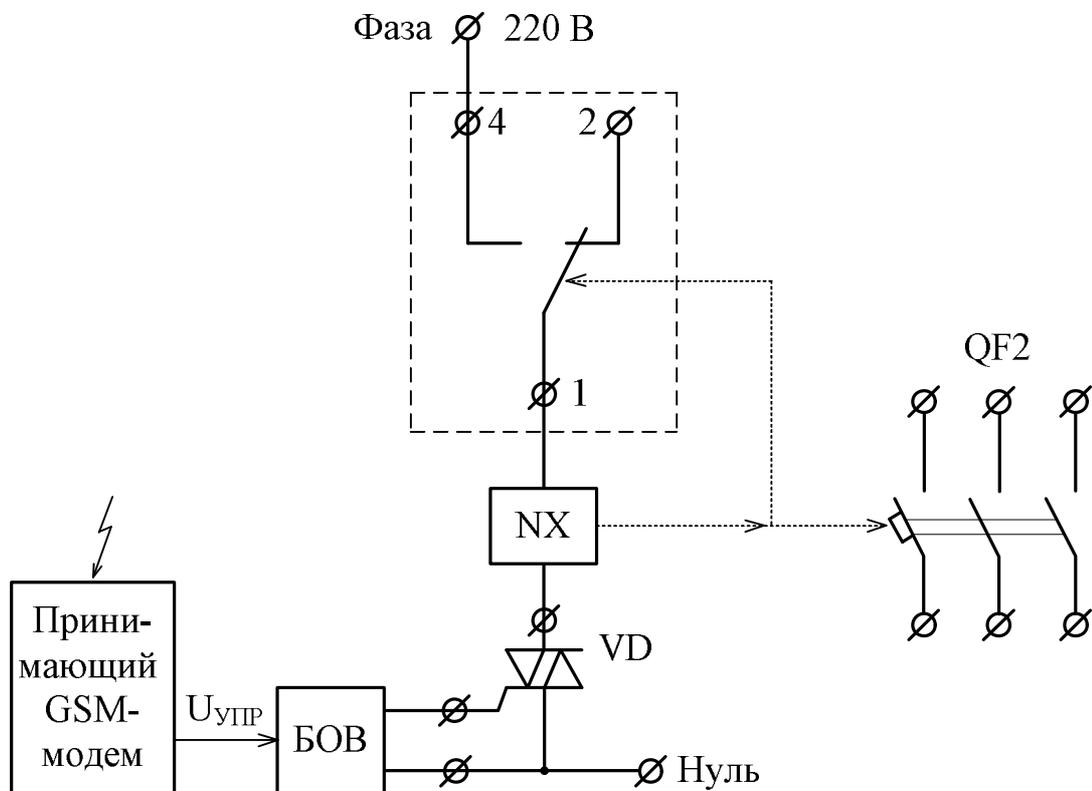


Рисунок 3.12 – Схема отключения выключателя QF2

Модуль дистанционного управления типа RC-101 по сотовой сети GSM позволяет дистанционно включать и отключать электронную или электрическую аппаратуру и оборудование. При этом соединение между передающим GSM-модемом и модулем управления не происходит, переключение режимов (включение / выключение) происходит на стадии вызова. Соответственно GSM трафик не расходуется. После исполнения команды модуль дистанционного управления автоматически сбрасывает вызов. С учётом использования стандарта GSM, расстояние не имеет значение, необходимо только наличие сети сотовой связи.

Блок отключения БОВ предназначен для организации подачи напряжения на независимый расцепитель НР, который воздействуя на механизм расцепления автоматического выключателя QF2, размыкает его силовые контакты. Для подачи фазного напряжения ( $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$ ) на независимый расцепитель НР используется полупроводниковый ключ, выполненный в виде симистора V2, управляемого блоком отключения выключателя БОВ.

Автоматический выключатель QF2 Compact NSX содержит кроме силовых контактов встроенные внутри его независимый расцепитель NX и вспомогательные контакты 1–4–2. Силовые и вспомогательные контакты выключателя механически жестко связаны, а независимый расцепитель NX для отключения выключателя воздействует на его механизм расцепления. Напряжение питания 220 В подаётся на независимый расцепитель NX через последовательно включенные с ним вспомогательные контакты 1–2–4 и симистор VD.

В нормальном режиме работы воздушной линии при включенных силовых контактах автоматического выключателя QF2 замкнуты вспомогательные контакты 1–4, подготавливая к работе независимый расцепитель NX. При возникновении аварийной ситуации, когда приходит команда отключающего сигнала, открывается симистор VD, подавая напряжение на независимый расцепитель NX. Последний, воздействуя на механизм расцепления силовых контактов выключателя QF2, отключает его. Одновременно при размыкании силовых контактов происходит разрывание вспомогательных контактов 1–4, при этом с независимого расцепителя снимается напряжение 220 В.

### 3.4 Выводы

1. 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.

2. Современные микропроцессорные системы учёта электрической энергии позволяют передавать информацию о потребляемой энергии в питающую трансформаторную подстанцию. Передача информации может осуществляться с использованием PLC- и GSM-технологий.

3. Если микропроцессорный счётчик наделить дополнительными функциями (дополнительной программой), позволяющими определять состояние электрической сети, а используя каналы передачи данных, передавать команду отключения повреждённой воздушной линии в трансформаторную подстанцию, то можно построить систему защиты воздушной линии при обрывах фазных и нулевого проводов.

4. Разработана система защиты при обрывах фазных и нулевого проводов, основанная на применении выпускаемого в нашей стране микропроцессорного счетчика электроэнергии, логическая часть которого дополнена программой выявления обрывов фазных и нулевого проводов.

5. Разработана организация передачи команды отключающего сигнала от микропроцессорного счётчика до автоматического выключателя, устанавливаемого в начале воздушной линии (в трансформаторной подстанции) для её отключения в случаях возникновения обрывов фазных и нулевого проводов.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В

Важной составной задачей научных исследований являются экспериментальные исследования, которые в плане выполнения данной работы следует разделить на два направления:

- исследование параметров электрической сети напряжением 380 В, образованной воздушными линиями, при различных режимах её работы;
- испытание системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.

Исследование параметров электрической сети при различных режимах работы проведены на компьютерной модели, в лабораторных условиях на физической модели электрической сети, в действующих электрических сетях и на опытной электрической сети. Испытания же системы защиты возможно проводить на физической модели, в действующих электрических сетях и на опытной электрической сети.

##### **4.1 Методика проведения экспериментальных исследований в опытной электрической сети**

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 [57, 58].

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:

Описание опытной электрической сети напряжением 380 В и её схем приведено в приложении Б настоящей диссертации. 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 [58, 65].

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-2UF2M», которые будут размещены в следующих точках электрической сети (рисунок 4.1):



Рисунок 4.1 – Схема расстановки измерительных комплектов «Ресурс-2UF2M»

– 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 [57, 58].

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  $R_{Н,В} = R_{Н,С} = 4,4$  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  $R_{Н,А} = \infty$  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  $R_{ЗУ,П} = 6,37$  Ом, а затем при отключенном заземляющем устройстве, т.е. при  $R_{ЗУ,П} = \infty$  Ом.

2. В отключенной электрической сети производим расстановку и подключение измерительных приборов согласно схеме, показанной на рисунке 4.1. 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  $R_{ЗУ,П} = 6,37$  Ом.

3.2. Устанавливаем одинаковые сопротивления нагрузки  $R_{Н,А} = R_{Н,В} = R_{Н,С} = 4,4$  Ом, соответствующие 100 %-й нагрузке воздушной линии (рисунок Б.5).

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 пе-

реключение сопротивления нагрузки  $R_{HA}$  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 сопротивлений  $R_{HA}$ , 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  $R_{ЗУ,П} = 6,37$  Ом остаётся включенным. Снова устанавливаем одинаковые сопротивления  $R_{HA} = R_{HB} = R_{HC} = 4,4$  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  $R_{HA}$  и  $R_{HB}$  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  $R_{HA}$  и  $R_{HB}$ , 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 Б.5) в ячейке нагрузочных сопротивлений, и в начале линии, извлекая предохранитель F2 в фазе В (рисунок Б.2).

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 фазы 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 (рисунок Б.5).

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  $R_{НА}$  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  $R_{НА}$ , 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  $R_{ЗУ.П}$  и при изменении нагрузки на фазе А.

9.1. В распределительном устройстве напряжением 0,4 кВ трансформаторной подстанции извлекаем плавкий предохранитель F2 фазы В. Подключаем к нейтральной точке нагрузочных сопротивлений заземляющее устройство  $R_{ЗУ.П} = 6,37$  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  $R_{ЗУ.П}$  и при изменении нагрузки на фазе А.

10.1. Производим отключение сопротивления заземляющего устройства  $R_{ЗУ.П}$  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 Б.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) – рисунок Б.5. 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.

#### **4.2. Экспериментальные исследования режимов работы электрической сети и испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов на физической модели напряжением 220 В**

Для проверки достоверности теоретических исследований, проведённых на компьютерной модели, было использовано физическое моделирование. Для этого в лаборатории кафедры «Системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета разработана физическая модель напряжением 220 В, прототипом которой явилась электрическая сеть напряжением 380 В со следующими параметрами: трансформатор мощность 160 кВА со схемой соединения обмоток  $Y/Y_N$ ; четырехпроводная радиальная воздушная линия с проводами марки А-3х70+1х70 мм<sup>2</sup>. Эти же данные прототипа были ранее заложены при разработке компьютерной модели электрической сети (см. раздел 2.2). Подробное описание физической модели представлено в приложении А к диссертации.

Результаты исследования (качественные и количественные) 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 и на физической модели практически совпадают. Сопоставление данных исследований на компьютерной и физической моделях и в опытной электрической сети будут приведены в разделе 4.3.

В таблице 4.1 представлены выборочные данные экспериментальных исследований на физической модели 10 наиболее характерных режимов работы электрической сети:

- три вида нормального режима работы с симметричной нагрузкой и двумя разновидностями несимметричной нагрузки;
- четыре вида обрыва фазного провода при различных вариантах симметричной и несимметричной нагрузки;

Таблица 4.1 – Выборочные данные экспериментальных исследований  
на физической модели режимов работы электрической сети

Время	Напряжение, В									Углы между фазными напряжениями, градус		
	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_0$	$U_1$	$U_2$	$\Phi_{UaUb}$	$\Phi_{UbUc}$	$\Phi_{UcUa}$
1. Нормальный режим; $R_A = R_B = R_C = 58 \text{ Ом}$												
14:05	119,2	118,8	117,9	207,0	204,9	204,5	0,37	205,5	1,527	120,84	119,95	119,21
14:06	119,3	118,9	117,9	207,1	205,0	204,7	0,34	205,6	1,547	120,83	119,88	119,29
14:07	119,3	118,9	117,9	207,2	205,1	204,6	0,34	205,6	1,588	120,87	119,91	119,22
2. Нормальный режим; $R_A = \infty \text{ Ом}; R_B = R_C = 58 \text{ Ом}$												
14:09	140,4	111,3	117,9	218,9	205,7	214,8	13,95	213,0	7,768	120,32	127,52	112,16
14:10	140,7	111,4	118,0	219,1	205,8	215,2	13,98	213,3	7,858	120,28	127,48	112,24
14:11	140,7	111,2	117,7	219,1	205,2	214,9	13,98	213,0	8,194	120,40	127,34	112,26
3. Нормальный режим; $R_A = \infty \text{ Ом}; R_B = \infty \text{ Ом}; R_C = 58 \text{ Ом}$												
14:13	141,0	132,8	109,2	228,7	217,9	215,8	14,92	220,7	8,062	113,22	128,12	118,66
14:14	141,3	133,3	109,6	229,2	218,9	216,5	15,00	221,4	7,835	113,08	128,26	118,66
14:15	141,4	133,3	109,6	229,3	218,8	216,5	15,00	221,5	7,920	113,12	128,25	118,63
4. Обрыв провода фазы А; $R_B = R_C = 58 \text{ Ом}$												
14:17	0,275	111,4	118,0	111,3	205,7	117,8	34,01	132,0	73,745	-66,27	127,44	-61,17
14:18	0,275	111,8	118,6	111,7	206,7	118,5	34,13	132,6	74,157	-66,19	127,48	-61,29
14:19	0,275	112,0	118,7	111,9	207,1	118,6	34,10	132,8	74,391	-66,22	127,62	-61,40
5. Обрыв провода фазы А; $R_B = \infty \text{ Ом}; R_C = 58 \text{ Ом}$												
14:21	0,305	133,3	109,9	133,5	219,1	109,6	36,14	140,0	79,678	-125,98	128,21	-2,23
14:22	0,303	133,4	109,8	133,6	219,1	109,5	36,11	140,0	79,706	-126,86	128,25	-1,39
14:23	0,305	133,3	109,9	133,5	219,1	109,6	36,10	140,0	79,709	-126,58	128,24	-1,66
6. Обрыв провода фазы А; $R_B = 58 \text{ Ом}; R_C = \infty \text{ Ом}$												
14:26	0,312	110,0	140,9	109,7	217,3	141,0	43,10	144,7	73,644	-0,03	119,47	-119,44
14:27	0,312	110,2	140,7	109,8	217,3	140,9	43,11	144,8	73,597	0,03	119,46	-119,49
14:28	0,308	111,0	140,5	110,7	217,7	140,7	43,15	145,1	73,695	0,03	119,48	-119,51

Окончание таблицы 4.1

Время	Напряжение, В									Углы между фазными напряжениями, градус		
	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_0$	$U_1$	$U_2$	$\Phi_{UaUb}$	$\Phi_{UbUc}$	$\Phi_{UcUa}$
7. Обрыв провода фазы А; $R_B = \infty$ Ом; $R_C = \infty$ Ом												
14:29	0,000	131,8	130,3	131,8	227,1	130,3	43,62	151,3	75,817	-46,43	120,11	-73,68
14:30	0,000	132,0	130,4	132,0	227,5	130,4	43,61	151,5	76,028	-44,97	120,21	-75,24
14:31	0,000	132,3	130,6	132,3	227,9	130,6	43,73	151,8	76,112	-46,52	120,18	-73,66
8. Обрыв нулевого провода; $R_A = R_B = R_C = 58$ Ом												
14:41	118,7	118,2	117,8	206,0	204,0	204,4	0,34	204,8	1,258	120,86	119,59	119,55
14:42	119,1	118,6	118,3	206,7	204,8	205,2	0,34	205,5	1,143	120,79	119,61	119,60
14:43	119,6	119,4	118,9	207,9	206,1	206,0	0,34	206,7	1,249	120,86	119,70	119,44
9. Обрыв нулевого провода; $R_A = \infty$ Ом; $R_B = R_C = 58$ Ом												
14:45	197,3	102,8	103,8	224,9	206,7	220,6	65,76	217,3	10,869	91,51	179,94	88,55
14:46	197,0	103,1	104,0	225,0	207,1	220,2	65,66	217,3	10,551	91,65	179,97	88,38
14:47	196,7	102,9	103,8	224,6	206,7	219,8	65,55	216,9	10,573	91,68	179,94	88,38
10. Обрыв нулевого провода; $R_A = R_B = 700 + 30000$ Ом; $R_C = 58$ Ом												
14:51	226,5	227,6	0,477	229,7	228,1	226,8	130,43	228,2	1,682	60,78	153,89	145,33
14:52	226,1	228,0	0,478	229,5	228,4	226,5	130,46	228,1	1,781	60,74	153,99	145,27
14:53	225,2	227,1	0,477	228,8	227,6	225,6	129,94	227,3	1,850	60,76	153,97	145,27

– три вида обрыва нулевого провода при различных вариантах симметричной и несимметричной нагрузки.

Для фиксации параметров электрической сети при физическом моделировании использовался цифровой самопишущий измерительный комплект типа «Ресурс-2UF2M», который был подключен вместо микропроцессорного счётчика.

Из полученных данных при физическом моделировании необходимо особо отметить исследованные 9 и 10 режимы работы воздушной линии при обрыве нулевого провода, которые повторяют результаты компьютерного моделирования – см. рисунок 2.23.

При 9-м режиме при обрыве нулевого провода, когда отсутствует нагрузка на фазе А, на двух других фазах она равна 100 %  $P_{H.МАКС}$ , два фазных напряжения  $U_{B.N2}$  и  $U_{C.N2}$  уменьшаются до половины линейного напряжения  $U_{BC.2}$ , а угол меж-

ду векторами этих фазных напряжений  $\varphi_{U_B U_C}$  становится равным  $180^0$  (см. таблицу 4.1 и рисунок 2.23,б). Третье фазное напряжение  $U_{A,N2}$  возрастает до 0,868 линейного напряжения, а его вектор с векторами других фазных напряжений имеет углы  $\varphi_{U_A U_B} = 91,65^0$  и  $\varphi_{U_C U_A} = 88,38^0$  (отличие от  $90^0$  объясняется искажением треугольника линейных напряжений при отсутствии нагрузки на фазе А).

При 10-м режиме при обрыве нулевого провода, когда нагрузка на фазе С составляет 100 %  $P_{H,МАКС}$ , а на фазах А и В равна 0,188 %  $P_{H,МАКС}$ . В этом случае напряжение на фазе С составляет только  $0,366 \cdot U_{\Phi}$ , а на фазах А и В напряжения возрастают до линейных значений, причём угол между векторами этих напряжений равен  $\varphi_{U_A U_B} = 60,74^0$  (см. таблицу 4.1 и рисунок 2.23,в).

Физическая модель позволила не только исследовать режимы работы электрической сети, но и оказалась эффективным инструментом при исследовании работы системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов.

В реализации системы защиты приняло участие ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», которое в свои выпускаемые микропроцессорные трёхфазные счётчики типа «Энергомера СЕ 303» внесло дополнительные функции, позволившие выявлять обрывы фазных и нулевого проводов, передавать команду отключающего импульса в трансформаторную подстанцию напряжением 10/0,4 кВ, где в начале воздушной линии установлен автоматический выключатель, и производить отключение этого выключателя при возникновении повреждений на линии.

Первая модификация микропроцессорного счётчика электрической энергии с дополнительными функциями 25–27 февраля 2014 г. была испытана на физической модели электрической сети в исследовательской лаборатории кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ. Проведённые испытания на физической модели показали принципиальную возможность использования микропроцессорного счётчика электрической энергии, дополненного определёнными функциями, в качестве системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.

Дальнейшие (март–апрель 2014 г.) расширенные испытания на физической модели системы защиты при различных режимах работы электрической сети (обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии, однофазные короткие замыкания и др.) при широком диапазоне несимметрии фазных нагрузок потребителей позволили выявить ряд недостатков системы защиты, например, последовательность срабатывания защиты и оповещения оперативного персонала о возникновении в электрической сети аварийной ситуации. В приложении Д к диссертации представлен «Протокол испытаний на физической модели системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов», в котором особенности и выявленные недостатки. По результатам лабораторных испытаний составлен «Акт испытаний системы защиты...» от 6 августа 2014 г., который утверждён ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», филиалом ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» и ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) – акт представлен в приложении Ж к диссертации.

Достоинством физической модели при подобных испытаниях является то, что достаточно просто и быстро по сравнению с реальной электрической сетью можно создавать различные режимы работы электрической сети. Это существенно ускоряет проведение испытаний системы защиты.

С учётом полученных результатов физического моделирования была подготовлена вторая модификация микропроцессорного счётчика, испытание которой было проведено 5 августа 2014 г. на полигоне «Челябэнерго» в опытной электрической сети напряжением 380 В.

#### **4.3 Экспериментальные исследования режимов работы воздушной линии в опытной электрической сети**

Для проведения экспериментальных исследований филиал ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» по проекту, разработанному в Южно-Уральском государственном университете, построил на своём учебном полигоне опытную электриче-

скую сеть напряжением 380 В. Подробное описание опытной электрической сети и её характеристики представлены в приложении Б к диссертации.

При экспериментальных исследованиях режимов работы опытной электрической сети смоделированы следующие режимные ситуации (результаты исследований представлены в приложении Е к диссертации):

1. При наличии сопротивления заземляющего устройства  $R_{з.п} = 6,37 \text{ Ом}$  (1-й этап исследований – таблица Е.1):

1.1. Нормальный режим работы:

1.1.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии – 1 режим.

1.1.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С – 4 режима.

1.1.3. Одновременное отсутствие нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С – 3 режима.

1.2. Обрыв провода фазы С – 3 режима.

1.3. Обрыв нулевого провода:

1.3.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии – 1 режим.

1.3.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С – 4 режима.

1.3.3. Одновременное отсутствие нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С – 4 режима.

2. При отключении сопротивления заземляющего устройства  $R_{з.п} = \infty \text{ Ом}$  (2-й этап исследований – таблица Е.2):

2.1. Нормальный режим работы:

2.1.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии – 1 режим.

2.1.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С – 4 режима.

2.1.3. Одновременное отсутствие нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С – 3 режима.

2.2. Обрыв провода фазы С – 3 режима.

2.3. Обрыв нулевого провода:

2.3.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии – 1 режим.

2.3.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С – 5 режимов.

2.1.3. Одновременное отсутствие нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С – 3 режима.

2.4.4. Изменение сопротивления заземляющего устройства  $R_{з.п}$  при предельных вариантах несимметрии нагрузки на фазах – 6 режимов.

3. Обрывы фазного или нулевого проводов в трансформаторной подстанции при предельных вариантах несимметрии нагрузки на фазах и симметричной нагрузке – 6 режимов (таблица Е.3).

4. При проведении испытаний системы защиты были смоделированы ещё два режима (таблица Е.3):

4.1. Однофазное короткое замыкание в конце линии – 1 режим.

4.2. Одновременный режим обрыва фазного и нулевого проводов в конце линии – 1 режим.

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований режимов работы электрической сети было смоделировано 53 различных режимных ситуации работы воздушной линии.

В таблице 4.2 проведено сопоставление результатов исследований, проведённых на компьютерной и физической моделях и в опытной электрической сети. Здесь представлены для различных режимов работы воздушной линии три фазных напряжения  $U_{A.N2}$ ,  $U_{B.N2}$ ,  $U_{C.N2}$  и напряжение нулевой последовательности  $U_{0.2}$  для конца воздушной линии, приведённые к фазному напряжению (при холостом режиме работы электрической сети – при полном отсутствии фазных нагрузок) соответственно компьютерной ( $U_{ф.км} = 233,7$  В) и физической ( $U_{ф.фм} = 130,46$  В)

моделей и опытной электрической сети ( $U_{\text{ф.ОЭС}} = 220 \text{ В}$ ). Указанные напряжения в таблице представлены в относительных единицах, что позволяет оценить результаты исследований.

Отметим, что на результаты исследований оказало как влияние некоторое различие параметров электрических сетей, так и соотношение фазных нагрузок потребителей. Это влияние выразилось в различии относительных фазных напряжений в конце линии при симметричных фазных нагрузках – см. 1-й режим в таблице 4.2. Однако эти факторы не оказали принципиального влияния на полученные результаты в целом.

Проанализируем и прокомментируем результаты сопоставления.

1. При нормальном режиме работы воздушной линии и изменении несимметрии фазных нагрузок основной параметр – напряжение нулевой последовательности  $U_0$ , не превышает значения  $0,17 \cdot U_{\text{ф}}$ .

2. При обрыве фазного провода на повреждённой фазе фиксируется практическое отсутствие напряжения за местом повреждения.

3. При обрыве нулевого провода:

3.1. При симметричной фазной нагрузке напряжение нулевой последовательности  $U_0$  равно или практически равно нулю.

3.2. В предельном случае при отсутствии нагрузки на одной из фаз сети напряжение нулевой последовательности достигает  $0,5 \cdot U_{\text{ф}}$ .

3.3. В другом предельном случае при отсутствии нагрузки одновременно на двух фазах напряжение нулевой последовательности возрастает до фазного значения.

***Резюме. Проведённое сопоставление результатов исследований на компьютерной и физической моделях и в опытной электрической сети показало хорошее совпадение как количественных, так и качественных характеристик параметров электрической сети при различных режимах её работы.***

Таблица 4.2 – Сопоставление результатов исследований режимов работы электрической сети напряжением 380 В на компьютерной и физической моделях и в опытной электрической сети ( $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$ )

№ п/п	Режим работы воздушной линии	Фазные нагрузки, % $P_{Н.МАКС}$	Напряжения сети, о.е.	Результаты исследований		
				на компьютерной модели	на физической модели	в опытной электрической сети
1	Нормальный режим работы	$P_{Н.А} = 100 \%$ $P_{Н.В} = 100 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	0,9	0,916	0,995
			$U_{В.Н2}$	0,9	0,913	0,996
			$U_{С.Н2}$	0,9	0,906	1,002
			$U_{0.2}$	0	0,0026	0,002
2		$P_{Н.А} = 0$ $P_{Н.В} = 100 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	1,115	1,084	1,186
			$U_{В.Н2}$	0,813	0,885	0,904
			$U_{С.Н2}$	0,895	0,906	0,998
			$U_{0.2}$	0,154	0,107	0,138
3		$P_{Н.А} = 0$ $P_{Н.В} = 0$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	1,118	1,085	1,192
			$U_{В.Н2}$	1,016	1,024	1,084
	$U_{С.Н2}$		0,792	0,842	0,894	
	$U_{0.2}$		0,170	0,115	0,154	
4	Обрыв провода фазы А	$P_{Н.В} = 100 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	0	0,0021	0,0018
			$U_{В.Н2}$	0,810	0,859	0,926
			$U_{С.Н2}$	0,906	0,911	1,028
			$U_{0.2}$	0,242	0,262	0,284
5		$P_{Н.В} = 0 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	0	0,0023	0,0012
			$U_{В.Н2}$	0,999	1,024	1,099
			$U_{С.Н2}$	0,805	0,843	0,928
			$U_{0.2}$	0,236	0,277	0,279
6		$P_{Н.В} = 100 \%$ $P_{Н.С} = 0 \%$	$U_{А.Н2}$	0	0,0024	0,0014
			$U_{В.Н2}$	0,805	0,846	0,923
			$U_{С.Н2}$	1,117	1,081	1,219
			$U_{0.2}$	0,354	0,331	0,386
7	$P_{Н.В} = 0 \%$ $P_{Н.С} = 0 \%$	$U_{А.Н2}$	0	0	0	
		$U_{В.Н2}$	1,00	1,012	1,009	
		$U_{С.Н2}$	1,00	1,00	1,003	
		$U_{0.2}$	0,333	0,334	0,333	
8	Обрыв нулевого провода	$P_{Н.А} = 100 \%$ $P_{Н.В} = 100 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	0,9	0,914	0,988
			$U_{В.Н2}$	0,9	0,911	0,988
			$U_{С.Н2}$	0,9	0,913	0,991
			$U_{0.2}$	0	0,0026	0,0014
9		$P_{Н.А} = 0$ $P_{Н.В} = 100 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	1,500	1,515	1,5000
			$U_{В.Н2}$	0,78	0,79	0,860
			$U_{С.Н2}$	0,78	0,798	0,858
			$U_{0.2}$	0,50	0,503	0,50
10		$P_{Н.А} = 0,1-0,18 \%$ $P_{Н.В} = 0,1-0,18 \%$ $P_{Н.С} = 100 \%$	$U_{А.Н2}$	1,730	1,733	1,731
			$U_{В.Н2}$	1,730	1,733	1,731
			$U_{С.Н2}$	0,0002	0,0037	0,0042
			$U_{0.2}$	0,9987	1,00	1,00

#### 4.4 Экспериментальные исследования системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов в опытной электрической сети напряжением 380 В

При испытании системы защиты в опытной электрической сети были созданы следующие режимные ситуации (таблица 4.3):

1. Нормальный режим работы:

1.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии.

1.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С.

1.3. Одновременное отсутствие нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С.

2. Обрыв провода фазы С в конце линии:

2.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии.

2.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полной нагрузке на фазе В (повторено 6 раз).

3. Обрыв нулевого провода:

3.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии.

3.2. Изменение нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С – 3 режима.

3.3. Одновременное отсутствие нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С (повторено 2 раза).

3.4. При отключении сопротивления заземляющего устройства  $R_{з.л} = \infty$  Ом и одновременном отсутствии нагрузки на фазах А и В при полной нагрузке на фазе С.

4. Одновременный режим фазного и нулевого проводов в конце линии:

4.1. При симметричной нагрузке электроприёмников в конце воздушной линии.

4.2. Отсутствие нагрузки на фазе А при полных нагрузках на фазах В и С.

Таблица 4.3 – Экспериментальные испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В (5 августа 2014 г.)

№ за-мера	Время эксперимента	Режим работы сети	Параметры опытной электрической сети при $R_{з.п} = 6,37 \text{ Ом}$						Параметры, появившиеся на мониторе микропроцессорного счетчика электроэнергии						Время дозвона диспетчеру и отключения выключателя QF2 в начале ВЛ, сек			Срабатывание защиты		
			Сопроотивления нагрузки, Ом			Фазные напряжения, В			Напряжения, В						$t_{д.д.}$	$t_{откл. QF2}$				
			$R_{н.А}$	$R_{н.В}$	$R_{н.С}$	$U_{A,N2}$	$U_{B,N2}$	$U_{C,N2}$	$U_{\Phi 1}$	$U_0$	1	2	3	4			5		6	$t_{д.д.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<p>1. Нормальный режим работы электрической сети</p> <p>1.1. Нагрузка симметричная  <math>U_{\Phi, ПР} = 65 \%</math>; <math>U_{\Phi, АВ} = 56 \%</math>; <math>U_{0, ПР} = 42 \text{ В}</math>; <math>U_{0, АВ} = 48 \text{ В}</math></p>																				
1	09-53	НР	4,42	4,46	4,46	216,6	216,2	217,6	-	0							Нет	Нет	Нет	Нет
<p>1.2. Нагрузка несимметричная  <math>U_{\Phi, ПР} = 65 \%</math>; <math>U_{\Phi, АВ} = 56 \%</math>; <math>U_{0, ПР} = 42 \text{ В}</math>; <math>U_{0, АВ} = 48 \text{ В}</math></p>																				
2	10-00	НР	$\infty$	4,46	4,46	259,5	198,3	219,0	-	30,0							Нет	Нет	Нет	Нет
<p>1.3. Нагрузка несимметричная  <math>U_{\Phi, ПР} = 65 \%</math>; <math>U_{\Phi, АВ} = 56 \%</math>; <math>U_{0, ПР} = 42 \text{ В}</math>; <math>U_{0, АВ} = 48 \text{ В}</math></p>																				
3	10-05	НР	$\infty$	$\infty$	4,46	261,7	237,1	197,5	-	33,2							Нет	Нет	Нет	Нет
<p>2. Обрыв фазы С в конце линии</p> <p>2.1. Нагрузка несимметричная  <math>U_{\Phi, ПР} = 65 \%</math>; <math>U_{\Phi, АВ} = 56 \%</math>; <math>U_{0, ПР} = 42 \text{ В}</math>; <math>U_{0, АВ} = 48 \text{ В}</math></p>																				
4	10-15	НР	$\infty$	4,46	4,46	259,2	197,7	219,2	219,2	30										
		ОФС	$\infty$	4,46	4,46	238,2	197,0	0,4	0,6	Err	+	+					15		44,3	Да
<p>2.2. Нагрузка симметричная  <math>U_{\Phi, ПР} = 65 \%</math>; <math>U_{\Phi, АВ} = 56 \%</math>; <math>U_{0, ПР} = 42 \text{ В}</math>; <math>U_{0, АВ} = 48 \text{ В}</math></p>																				
5	10-26	НР	4,42	4,46	4,46	218,2	217,9	219,2	219,2	0										
		ОФС	4,42	4,46	4,46	198,9	218,9	0,17	0,6	Err	+	+					17,9		53	Да
<p>2.3. Нагрузка симметричная  <math>U_{\Phi, ПР} = 56 \%</math>; <math>U_{\Phi, АВ} = 56 \%</math>; <math>U_{0, ПР} = 42 \text{ В}</math>; <math>U_{0, АВ} = 48 \text{ В}</math></p>																				
6	10-35	НР	4,42	4,46	4,46	218,2	217,9	219,2	219,2	0										
		ОФС	4,42	4,46	4,46	198,9	218,9	0,17	0,6	Err	+	+					19,7		33,3	Да

Продолжение таблицы 4.3 – Экспериментальные испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В

№ за-мера	Время эксперимента	Режим работы сети	Параметры опытной электрической сети при $R_{зуд} = 6,37 \text{ Ом}$						Параметры, появившиеся на мониторе микропроцессорного счетчика электроэнергии						Время дозвона диспетчеру и отключения выключателя QF2 в начале ВЛ, сек			Срабатывание защиты			
			Сопротивления нагрузки, Ом			Фазные напряжения, В			Напряжения, В		Маркеры				$t_{ДЛД}$	$t_{Д2Д}$	$t_{откл.QF2}$				
			$R_{HA}$	$R_{HB}$	$R_{HC}$	$U_{A,N2}$	$U_{B,N2}$	$U_{C,N2}$	$U_{\Phi 1}$	$U_0$	1	2	3	4					5	6	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
<b>2.4. Нагрузка симметричная</b>																					
$U_{\Phi, \text{пр}} = 65 \%$ , но отключили номер дозвона; $U_{\Phi, \text{AB}} = 56 \%$ ; $U_{0, \text{пр}} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, \text{AB}} = 48 \text{ В}$																					
7	11-05	НР	4,42	4,46	4,46	218,2	217,9	219,2	219,2	0											
		ОФС	4,42	4,46	4,46	198,9	218,9	0,17	0,6	Егг	+					+			20	Да	
<b>2.5. Нагрузка симметричная</b>																					
$U_{\Phi, \text{пр}} = 65 \%$ , но отключили номер дозвона; $U_{\Phi, \text{AB}} = 56 \%$ ; $U_{0, \text{пр}} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, \text{AB}} = 48 \text{ В}$																					
8	11-13	НР	4,42	4,46	4,46	218,2	217,9	219,2	219,2	0											
		ОФС	4,42	4,46	4,46	198,9	218,9	0,17	0,6	Егг	+					+			75	Да	
<b>2.6. Нагрузка симметричная</b>																					
$U_{\Phi, \text{пр}} = 65 \%$ , номер дозвона восстановлен; $U_{\Phi, \text{AB}} = 56 \%$ ; $U_{0, \text{пр}} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, \text{AB}} = 48 \text{ В}$																					
9	11-19	НР	4,42	4,46	4,46	217,1	216,9	218,2	218,2	0											
		ОФС	4,42	4,46	4,46	198,9	218,9	0,17	0	Егг	+					+		15,3	60,2	Да	
<b>3. Обрыв нулевого провода в конце линии</b>																					
<b>3.1. Нагрузка симметричная</b>																					
$U_{\Phi, \text{пр}} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, \text{AB}} = 56 \%$ ; $U_{0, \text{пр}} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, \text{AB}} = 48 \text{ В}$																					
10	11-25	НР	4,42	4,46	4,46	218,2	217,8	219,1	-	0,3											
		ОН	4,42	4,46	4,46	218,2	218,1	218,5	-	0									Нет	Нет	
<b>3.2. Нагрузка несимметричная</b>																					
$U_{\Phi, \text{пр}} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, \text{AB}} = 56 \%$ ; $U_{0, \text{пр}} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, \text{AB}} = 48 \text{ В}$																					
11	11-48	НР	9,26	8,35	4,46	236,7	224,6	210,0	-	13											
		ОН	9,26	8,35	4,46	250,2	242,6	184,0	-	42						+		24	Нет	Нет	
<b>3.3. Нагрузка несимметричная</b>																					
$U_{\Phi, \text{пр}} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, \text{AB}} = 56 \%$ ; $U_{0, \text{пр}} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, \text{AB}} = 48 \text{ В}$																					
12	11-56	НР	12,97	12,03	4,46	229,3	218,3	219,5	-	19											
		ОН	12,97	12,03	4,46	263,9	260,2	166,9	-	52						+		16,2	64	Да	

Продолжение таблицы 4.3 – Экспериментальные испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В

№ за-мера	Время эксперимента	Режим работы сети	Параметры опытной электрической сети при $R_{зуп} = 6,37 \text{ Ом}$						Параметры, появившиеся на мониторе микропроцессорного счетчика электроэнергии						Время дозвона диспетчеру и отключения выключателя QF2 в начале ВЛ, сек			Срабатывание защиты		
			Сопротивления нагрузки, Ом			Фазные напряжения, В			Напряжения, В			Маркеры			t <sub>д.д.</sub>	t <sub>откл.QF2</sub>	t <sub>откл.QF2</sub>			
			R <sub>НА</sub>	R <sub>НВ</sub>	R <sub>НС</sub>	U <sub>AN2</sub>	U <sub>BN2</sub>	U <sub>CN2</sub>	U <sub>Ф1</sub>	U <sub>0</sub>	1	2	3	4					5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3.4. Нагрузка несимметричная																				
$U_{ф,гр} = 65 \%$ ; $U_{ф,ав} = 56 \%$ ; $U_{0,гр} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0,ав} = 48 \text{ В}$																				
13	12-01	НР	∞	4,46	4,46	260,0	197,8	219,0	–	31										
		ОН	∞	4,46	4,46	322,5	192,1	189,8	–	95	+	+	+	+	+		35		82	Да
3.5. Нагрузка несимметричная																				
$U_{ф,гр} = 65 \%$ ; $U_{ф,ав} = 56 \%$ ; $U_{0,гр} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0,ав} = 48 \text{ В}$																				
14	12-10	НР	∞	4,46	262,4	237,8	196,8,7	–	34											
		ОН	∞	4,46	321,1	323,9	100,9	–	154	+	+	+	+	+	+	+	15	42	79	Да
3.6. Нагрузка несимметричная																				
$U_{ф,гр} = 65 \%$ ; $U_{ф,ав} = 56 \%$ ; $U_{0,гр} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0,ав} = 48 \text{ В}$																				
15	12-18	НР	∞	4,46	262,8	238,2	197,7	–	34											
		ОН	∞	4,46	321,1	323,9	100,9	–	152	+	+	+	+	+	+	+	15	50,7	89,5	Да
3.7. Нагрузка несимметричная																				
$U_{ф,гр} = 65 \%$ ; $U_{ф,ав} = 56 \%$ ; $U_{0,гр} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0,ав} = 48 \text{ В}$																				
Отключили заземляющее устройство потребителя – $R_{зуп} = \infty \text{ Ом}$																				
16	12-26	НР	∞	4,46	262,7	238,4	195,8	–	35											
		ОН	∞	4,46	330,0	330,0	0	–	Егг	+						+	17		59	Да
4. Одновременный обрыв фазы С и нулевого провода N																				
$U_{ф,гр} = 65 \%$ ; $U_{ф,ав} = 56 \%$ ; $U_{0,гр} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0,ав} = 48 \text{ В}$																				
4.1. Нагрузка несимметричная																				
17	13-27	НР	∞	4,46	259,5	197,2	218,7	218,7	32											
		ОФИН	∞	4,46	4,46	–	–	–	0	Егг	+	+	+	+	+	+	19,7		53,2	Да

Продолжение таблицы 4.3 – Экспериментальные испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В

№ за-мера	Время эксперимента	Режим работы сети	Параметры опытной электрической сети при $R_{з.л} = 6,37 \text{ Ом}$						Параметры, появляющиеся на мониторе микропроцессорного счетчика электроэнергии						Время дозвона диспетчеру и отключения выключателя QF2 в начале ВЛ, сек				Срабатывание защиты		
			Сопротивления нагрузки, Ом			Фазные напряжения, В			Напряжения, В			Маркеры			$t_{Д1,Д}$	$t_{откл, QF2}$	$t_{Д2,Д}$	$t_{откл, QF2}$			
			$R_{НА}$	$R_{НВ}$	$R_{НС}$	$U_{АН2}$	$U_{ВН2}$	$U_{СН2}$	$U_{Ф1}$	$U_{Ф0}$	1	2	3	4						5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
4.2. Нагрузка симметричная																					
18	13-33	НР	4,42	4,46	4,46	217,3	216,8	218,7	218,7	0,3											
		ОФИН	4,42	4,46	4,46	-	-	-	0	Егг	+	+				+	17,1		62	Да	
5. Однофазное короткое замыкание в конце линии																					
5.1. Нагрузка симметричная																					
19	13-52	НР	4,42	4,46	4,46	217,0	216,5	218,1	218,1	1											
		ОКЗ	4,42	4,46	4,46	-	-	-	0	Егг	+					+	16,4		61	Да	
5.2. Нагрузка симметричная																					
20	13-56	НР	4,42	4,46	4,46	217,0	216,5	218,4	218,4	1											
		ОКЗ	4,42	4,46	4,46	-	-	-	0	Егг	+					+	16,3		59,5	Да	
6. Обрыв фазы С в трансформаторной подстанции (в начале линии)																					
6.1. Нагрузка симметричная																					
21	14-49	НР	4,42	4,46	4,46	216,1	216,1	216,8	216,8	0											
		ОФС	4,42	4,46	4,46	216,1	216,1	216,8	0	Егг	+					+	17,5		56	Да	
6.2. Нагрузка несимметричная																					
22	14-55	НР	$\infty$	4,46	4,46	259,4	196,8	217,2	217,2	31											
		ОФС	$\infty$	4,46	4,46	238,2	197,0	0,4	0	Егг	+					+	19		62	Да	

Окончание таблицы 4.3 – Экспериментальные испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии в опытной электрической сети напряжением 380 В

№ за-мера	Время эксперимента	Режим работы сети	Параметры опытной электрической сети при $R_{\Sigma П} = 6,37 \text{ Ом}$						Параметры, появляющиеся на мониторе микропроцессорного счетчика электроэнергии						Время дозвона диспетчеру и отключения выключателя QF2 в начале ВЛ, сек				Срабатывание защиты		
			Сопrotивления нагрузки, Ом			Фазные напряжения, В			Напряжения, В						Маркеры						
			$R_{HA}$	$R_{HB}$	$R_{HC}$	$U_{A,N2}$	$U_{B,N2}$	$U_{C,N2}$	$U_{\Phi 1}$	$U_0$	1	2	3	4	5	6	$t_{ДЛД}$	$t_{ОПД}$		$t_{ОПД2}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
<b>6.3. Нагрузка несимметричная</b> $U_{\Phi, ГР} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, АВ} = 56 \%$ ; $U_{0, ГР} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, АВ} = 48 \text{ В}$ Включаем воздушную линию и счётчик сразу с оборванной фазой																					
23	15-00	ОФС	$\infty$	4,46	4,46	238,2	197,0	0,4	0	Егг	+	+	+	+	+	+	120	145		Да	
<b>6.4. Нагрузка несимметричная</b> $U_{\Phi, ГР} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, АВ} = 56 \%$ ; $U_{0, ГР} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, АВ} = 48 \text{ В}$																					
24	15-06	НР	$\infty$	4,46	259,9	237,3	186,2	186,2	33												
		ОФС	$\infty$	4,46	-	-	-	0	Егг	+	+	+	+	+	+	+	19,4	65		Да	
<b>7. Обрыв нулевого провода в трансформаторной подстанции (в начале линии)</b> <b>7.1. Нагрузка несимметричная</b> $U_{\Phi, ГР} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, АВ} = 56 \%$ ; $U_{0, ГР} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, АВ} = 48 \text{ В}$																					
25	15-27	НР	$\infty$	4,46	264,0	240,3	192,8	-	33												
		ОН	$\infty$	4,46	321,0	323,9	100,9	-	109	+	+	+	+	+	+	+	21	56,7	99	Да	
<b>7.2. Нагрузка несимметричная</b> $U_{\Phi, ГР} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, АВ} = 56 \%$ ; $U_{0, ГР} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, АВ} = 48 \text{ В}$																					
26	15-34	НР	$\infty$	4,46	258,9	198,0	218,9	-	29												
		ОН	$\infty$	4,46	322,5	192,1	189,8	-	77	+	+	+	+	+	+	+	17,6	56,8		Да	
<b>7.3. Нагрузка симметричная</b> $U_{\Phi, ГР} = 65 \%$ ; $U_{\Phi, АВ} = 56 \%$ ; $U_{0, ГР} = 42 \text{ В}$ ; $U_{0, АВ} = 48 \text{ В}$																					
27	15-39	НР	4,42	4,46	216,4	216,4	217,9	-	1												
		ОН	4,42	4,46	216,4	216,4	217,9	-	0								Нет			Нет	Нет

5. Однофазное короткое замыкание в конце линии (повторено 2 раза).

6. Обрывы фазного или нулевого проводов в трансформаторной подстанции при предельных вариантах несимметрии нагрузки на фазах и симметричной нагрузке – 6 режимов.

Таким образом, при проведении испытаний системы защиты было смоделировано 20 различных режимных ситуаций работы воздушной линии, некоторые режимные ситуации были выполнены два и более раз.

Всего было выполнено 27 включений электрической сети, при которых рассматривалось действие системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов – см. таблицу 4.3. На все созданные режимные ситуации система защиты реагировала правильно и действовала соответствующим образом. Рассмотрим подробнее:

1. При нормальном режиме работы при симметричной и несимметричной нагрузке на фазах система защиты не срабатывала.

2. При обрыве провода фазы С при шестикратном повторе режимной ситуации система защиты чётко выдавала команду (через 2–3 сек) на отключение автоматического выключателя QF2, установленного в начале воздушной линии. Отключение выключателя происходило с выдержкой времени от 20 до 75 сек – задержка времени определяется необходимостью передачи команды отключающего сигнала от микропроцессорного счётчика до приёмного GSM-модема, установленного в трансформаторной подстанции, по сотовой телефонной связи.

3. При обрыве нулевого провода и при симметричной или небольшой несимметрии фазных нагрузок система защиты не срабатывала – *т.е. правильно распознала режимную ситуацию*. В первом случае при симметричной нагрузке система не выдала никакого сигнала. А во втором случае при небольшой несимметрии (при  $U_0 < U_{уст2}$ ) сработала предупредительная сигнализация, отправившая звонок «диспетчеру» о повышении напряжения нулевой последовательности.

4. При значительной несимметрии (при  $U_0 > U_{уст2}$ ) и предельных случаях несимметрии (5 включений) система защиты правильно определяла режимные ситуации и отключала воздушную линию с временем от 59 до 89,5 сек.

5. При одновременном обрыве фазного и нулевого проводов в конце воздушной линии при разных значениях несимметрии фазных нагрузок (2 ситуации) система защиты правильно определяла аварийные ситуации и отключала воздушную линию с временем 53,2 и 62 сек.

6. При однофазном коротком замыкании в конце линии, выполненном дважды, автоматический выключатель QF2, защищающий линию, не отключался. Отключила линию с однофазным коротким замыканием система защиты за время 59,5 и 61 сек, ***выполнив резервирование автоматического выключателя QF2.***

7. Обрывы фазного или нулевого провода в начале воздушной линии при различных вариантах несимметрии фазной нагрузки система защиты определяла правильно и отключала линии с выдержкой времени от 56 до 145 сек.

8. При обрыве нулевого провода в начале воздушной линии и симметричной фазной нагрузке система защиты правильно определила режимную ситуацию и не отключила линию.

***Резюме. Проведённые испытания показали принципиальную возможность использования микропроцессорного счётчика электрической энергии, дополненного определёнными функциями, в качестве системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.***

По результатам экспериментальных испытаний составлен «Акт испытаний системы защиты...» от 6 августа 2014 г., который утверждён ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», филиалом ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» и ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) – акт представлен в приложении Ж к диссертации.

#### 4.5 Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В при внедрении системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов

Уровень электробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В до и после внедрения системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов определим с помощью логико-вероятностного метода, математическая сущность которого изложена в [61, 113, 116]. Адаптация этого метода к электрическим сетям до 1000 В с глухо заземлённой нейтралью была проведена Катаевой Н.К. [33], Сидоровым А.И. [72], Суворовым И.Ф. [80, 81].

Для построения логико-вероятностной модели возникновения электроопасной ситуации воспользуемся схемами электрической сети напряжением 380 В, первая из которых не содержит разрабатываемую нами систему защиты от обрывов фазных и нулевого проводов, а вторая, наоборот, имеет указанную систему (рисунок 4.2, а, б) [47].

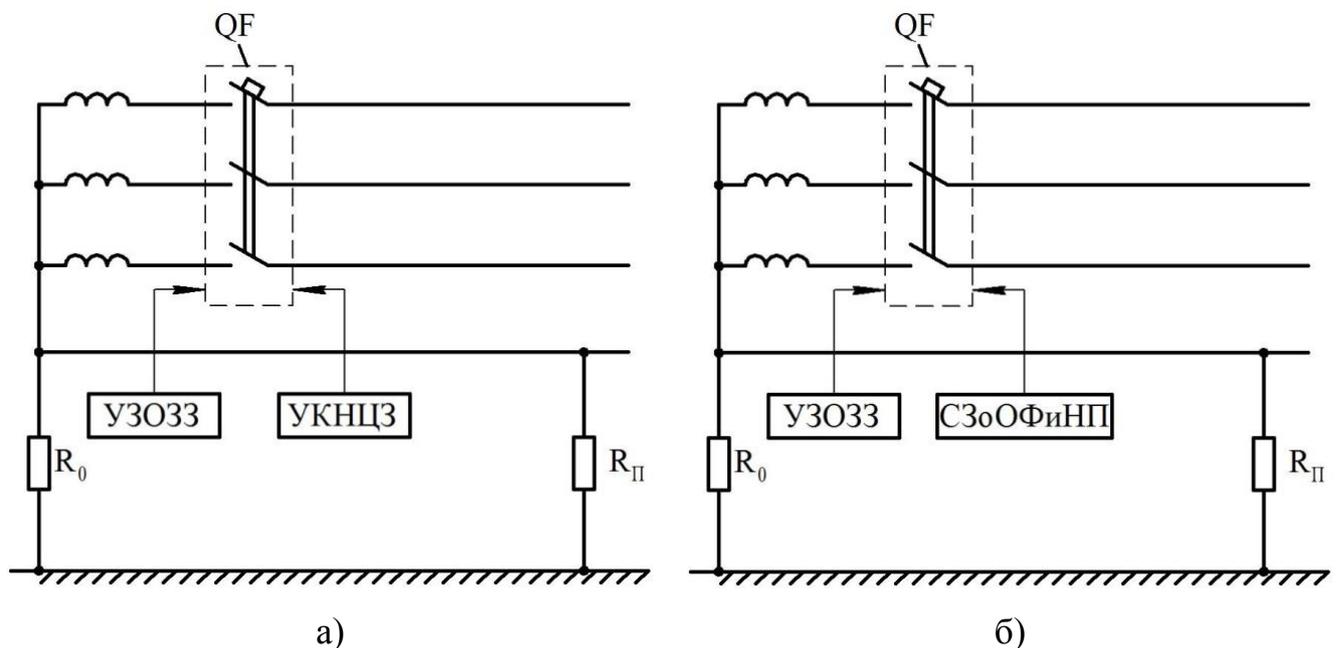


Рисунок 4.2 – Схема электрической сети напряжением 380 В: QF – автоматический выключатель;  $R_0$ ,  $R_{II}$  – сопротивления заземления нейтрали и повторного заземления; УЗОЗЗ – устройство защиты от однофазных замыканий на землю; УКНЦЗ – устройство контроля непрерывности цепи зануления; СЗоОФиНП – система защиты от обрыва фазных и нулевого проводов

Отсутствие УКНЦЗ на рисунке 4.2,б объясняется тем, что его функции выполняет СЗоОФиНП.

Возникновение опасных ситуаций, обусловленных обрывом любого фазного, либо нулевого проводов, подробно рассмотрено в [46].

Логико-вероятностная модель возникновения электроопасной ситуации при обрыве нулевого провода приведена на рисунке 4.3,а, обрыва любого из фазных проводов – на рисунке 4.3,б. На рисунках 4.3,в и 4.3,г соответственно те же модели, в которых учтено наличие в сети СЗоОФиНП.

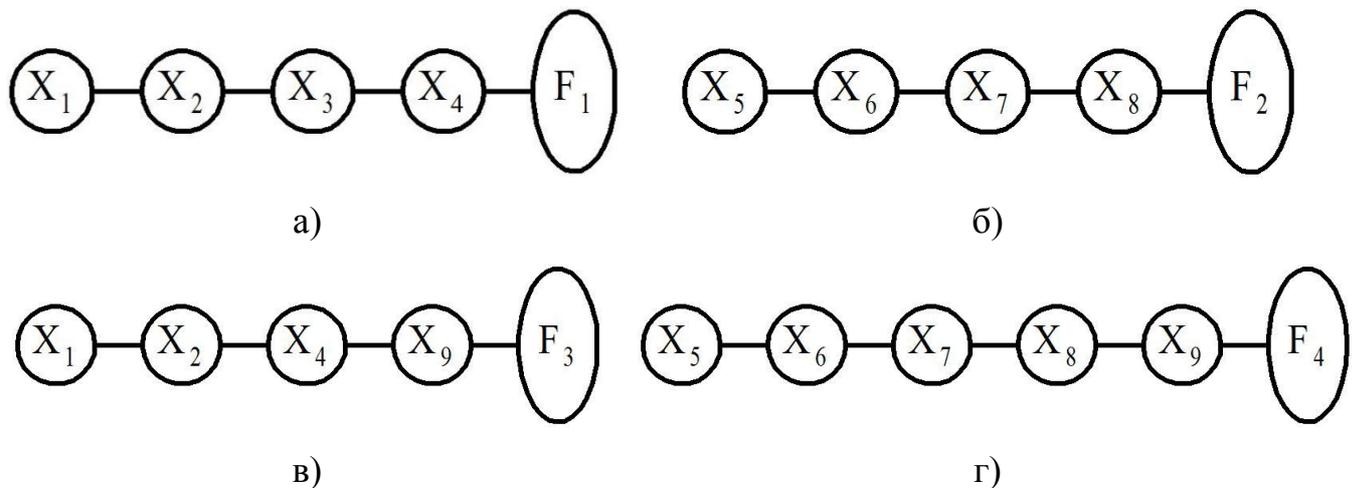


Рисунок 4.3 – Логико-вероятностные модели возникновения опасной ситуации соответственно при обрыве нулевого провода (а), фазного провода (б) в случае отсутствия СЗоОФиНП и при обрыве нулевого провода (в), фазного провода (г) при наличии СЗоОФиНП

Содержание событий  $x_i$  и  $F$  указано в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Содержание событий, образующих логико-вероятностные модели

Событие	Содержание события
$X_1$	Прикосновение к корпусу электроустановки при обрыве нулевого провода
$X_2$	Обрыв нулевого провода
$X_3$	Отказ в работе устройства контроля непрерывности цепи зануления

Окончание таблицы 4.4

Событие	Содержание события
X <sub>4</sub>	Наличие несимметрии нагрузки в электрической сети, где произошёл обрыв нулевого провода
X <sub>5</sub>	Обрыв фазного провода
X <sub>6</sub>	Прикосновение к оборванному фазному проводу
X <sub>7</sub>	Отказ в работе защиты от однофазных замыканий на землю
X <sub>8</sub>	Отказ в работе аппарата, установленного в голове линии
X <sub>9</sub>	Отказ в работе системы защиты от обрывов фазного и нулевого проводов
F <sub>1-4</sub>	Возникновение электроопасной ситуации при обрывах фазного и нулевого проводов и отсутствии или наличии системы защиты от указанных обрывов соответственно

Изменение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В при внедрении системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов определим через отношения вероятностей возникновения электроопасных ситуаций:

$$\frac{P_{F1}}{P_{F3}} \text{ и } \frac{P_{F2}}{P_{F4}}. \quad 4.1$$

Поскольку на рисунке 4.3,а–г события соединены последовательно, вероятности P<sub>F1</sub>–P<sub>F4</sub> определяются по теореме умножения вероятностей независимых событий (приведённые в таблице 4.4 события являются независимыми, т.е. возникновение любого из них не зависит от какого-либо другого события).

Следовательно, изменение уровня электробезопасности до и после внедрения СЗоОФиНП при обрыве нулевого провода определяется:

$$\frac{P_{F1}}{P_{F3}} = \frac{P_{F3}}{P_{F9}}. \quad 4.2$$

Можно полагать, что при наличии в сети УКНЦЗ уровень электробезопасности при обрыве нулевого провода после внедрения СЗоОФиНП не изменится (это бу-

дет справедливо, если  $P_{X3}$  и  $P_{X9}$  равны между собой). Реальные же значения вероятностей событий  $X_3$  и  $X_9$  могут быть определены на основании статистических данных по отказам, находящихся в эксплуатации указанных устройств и систем. Следует отметить, что УКНЦЗ в реальных сетях эксплуатируются в единичных экземплярах, в то время как созданная нами СЗоОФиНП будет широко внедряться. Потому фактически  $P_{X3} \neq P_{X9}$ .

Изменение уровня электробезопасности при обрыве любого из фазных проводов при отсутствии и наличии СЗоОФиНП определяется отношением:

$$\frac{P_{F2}}{P_{F4}} = \frac{1}{P_{X9}}. \quad 4.3$$

Как уже отмечалось выше, данных по вероятности отказов СЗоОФиНП в настоящее время нет. Если воспользоваться результатами, приведёнными в [81], то получим ( $P_{X9} = 5 \cdot 10^{-2}$ ), что уровень электробезопасности при внедрении СЗоОФиНП повысится не менее, чем в 20 раз.

Таким образом, внедрение в практику эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В сетей с глухо заземлённой нейтралью системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов повысит уровень электробезопасности не менее чем в 20 раз. Кроме того, внедрение упомянутой системы обеспечит так же социально-экономический эффект, обусловленный предотвращением гибели людей и животных.

#### 4.6 Выводы

1. Проведённые экспериментальные исследования режимов работы опытной электрической сети подтвердили результаты аналогичных теоретических исследований на компьютерной модели электрической сети и экспериментальных исследований на физической модели и показали правильность использованных методов анализа режимов работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями электропередачи. Сопоставление результатов исследований на компьютерной и физической моделях и в опытной электрической сети показало

хорошее совпадение как количественных, так и качественных характеристик параметров электрической сети при различных режимах её работы.

2. Проведённые испытания показали принципиальную возможность использования микропроцессорного счётчика электрической энергии, дополненного определёнными функциями, в качестве системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.

3. Проведённые испытания системы защиты показали её функциональные возможности, позволяющие идентифицировать, как заранее заданные режимы работы электрической сети (нормальный режим работы при широком изменении несимметрии фазных нагрузок; обрывы фазных и нулевого проводов), так и ряд других аварийных режимов (однофазное короткое замыкание в удалённых точках сети; одновременные обрывы фазного и нулевого проводов и др.).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы работы:

1. На компьютерной модели электрической сети напряжением 380 В были проведены исследования 34 подрежимов, результаты которых позволили установить закономерности в изменениях напряжений в этой сети при обрывах фазных и нулевого проводов.

2. Анализ установленных закономерностей в изменении напряжений 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.

3. Исследования в реальных электрических сетях, а также в опытной электрической сети подтвердили достоверность результатов, полученных на компьютерной модели сети

4. Разработана система защиты при обрывах фазных и нулевого проводов, основанная на применении микропроцессорного счетчика электроэнергии, логическая часть которого дополнена программой (функциями) выявления обрывов фазных и нулевого проводов.

5. Предложена организация передачи команды отключения в электрической сети напряжением 380 В с периферийных устройств на аппараты коммутации воздушных линий.

6. Внедрение разработанной системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов позволит повысить уровень электробезопасности в электрической сети с глухозаземленной нейтралью, содержащей воздушные линии электропередачи напряжением 380 В, не менее чем в 20 раз.

7. Опытная партия (10 экз.) системы защиты при обрывах фазных и нулевого проводов установлена на воздушных линиях Красноармейского РЭС филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, В.В. Электробезопасность в колхозах и совхозах [Текст] / В.В. Александров. – М.: 1985. – 175 с.
2. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов [Текст] / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2007. – 639 с.
3. Ануфриев, И.Е. Matlab 7 [Текст] / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
4. Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта потребления энергоносителей АИИС «Меркурий-ЭНЕРГОУЧЁТ» [Текст]. – М.: ООО «НПК «ИНКОТЕКС». – 2014. – 9 с.
5. АИИС КУЭ PLC [Текст]. – Ставрополь: ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», 2012. – 8 с.
6. АСКУЭ. Комплекс технических и программных средств «Энергомера» / Прозрачные решения [Текст]. – Ставрополь: ЗАО «Энергомера», 2013. – 8 с.
7. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства [Текст] / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
8. Валеев, Р.Г. Методика проведения экспериментальных исследований параметров воздушных линий электропередачи напряжением 380 В [Текст] / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров, А.М. Ершов, Е.Л. Шахин. – Электробезопасность. – 2012. – № 2–3. – С. 3–10.
9. 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.
10. 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.

11. Валеев, Р.Г. Компьютерная модель для исследования несимметричных режимов работы воздушных линий напряжением 380 В [Текст] / Р.Г. Валеев, А.М. Ершов, А.И. Сидоров, А.В. Млоток // Материалы ЛП Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2013. – Ч.V. – С. 131–135.
12. Васильева, Т.Н. Надёжность электрооборудования трансформаторных подстанций [Текст] / Т.Н. Васильева // Энергетик. – 2000. – № 8. – С. 34–36.
13. Васильева, Т.Н. Оценка влияния климатических факторов на отказы воздушных линий 0,4 кВ [Текст] / Т.Н. Васильева, Д.Н. Микрюков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 6. – С. 16–18.
14. Васильева, Т.Н. Надёжность и техническое обслуживание электроэнергетических систем в сельском хозяйстве [Текст] / Т.Н. Васильева. – Рязань: Из-во «ФГБОУ ВПО РГАТУ», 2013. – 195 с.
15. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
16. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е перераб. и доп. [Текст] / А.И. Вольдек – Л.: «Энергия», 1974. – 840 с.
17. Гордон, С.В. Монтаж сельских электроустановок [Текст] / С.В. Гордон. – М.: Колос, 1979.
18. ГОСТ 12.1.038-82 (2001). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений и токов [Текст]. – Введ. 1983–07–01. М.: Изд-во стандартов, 2001. – 5 с.
19. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей [Текст] / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Ата: Кайнар, 1984. – 128 с.
20. Григорьев, Н.Д. Смещение потенциала нейтрали трансформаторов  $Y/Y_n$  при однофазной нагрузке [Текст] / Н.Д. Григорьев // Промышленная энергетика. – 2002. – С. 41–45.
21. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках [Текст] / П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 442 с.

22. Долин, П.А. Электробезопасность. Теория и практика: учебное пособие для вузов [Текст] / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Крючков, А.Ф. Монахов; под ред. В.Т. Медведева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 280 с.

23. Дубов, А.Л. Методика расчёта режимов и комплексная защита воздушных линий напряжением до 1 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 [Текст] / А.Л. Дубов. – Екатеринбург: УПИ, 1992. – 21 с.

24. Ерёмина, Т.В. Математическая модель электропоражения человека [Текст] / Т.В. Ерёмина, О.К. Никольский // Вестник КрасГАУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 250–255.

25. Ерёмина, Т.В. Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок [Текст] / Т.В. Ерёмина. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2010. – 198 с.

26. Ершов, А.М. Построение защиты воздушных линий электропередачи напряжением 380 В от однофазных замыканий на землю [Текст] / А.М. Ершов, А.И. Сидоров, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – Т.1. – С. 223–227.

27. 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.

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

29. Ершов, А.М. Разработка физической модели электрической сети напряжением 380 В [Текст] / Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И., Млоток А.В. – Электробезопасность. – 2014. – № 1. – С. 3–18.

30. Желиховский, Х.М. Автоматический контроль исправности цепи зануления [Текст] / Х.М. Желиховский, А.А. Чупайленко, Н.И. Остапенко // Промышленная энергетика, 1977. – № 3. – С. 41–43.

31. Интеллектуальные электросети / Руководство разработчика. Вып. 1 [Текст]. – Innovation Delivered «Maxim», 2011. – 56 с.
32. Казимир, А.П. Эксплуатация электроустановок и электробезопасность в сельском хозяйстве [Текст] / А.П. Казимир, И.Е. Керпелова, Н.И. Прудников. – Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1980 – 191 с.
33. Катаева, Н.К. Повышение электробезопасности коммунально-бытовых электропотребителей в сельском хозяйстве: автореферат дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Н.К. Катаева. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1989. – 15 с.
34. Косоухов, Ф.Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях [Текст] / Ф.Д. Косоухов, И.В. Наумов. – Иркутск: ИрГСХА, 2003. – 259 с.
35. Коструба, С.И. Электробезопасность на фермах [Текст] / И.С. Коструба. – М.: Росагропромиздат, 1990.
36. Коструба, С.И. Человека защитит УЗО при авариях на воздушных линиях электропередачи [Текст] / С.И. Коструба // Новости электротехники. – 2004. – № 1 (25).
37. Круг, К.А. Основы электротехники [Текст] / К.А. Круг. – М. – Л.: ОНТИ, 1936. – 887 с.
38. Крючков, И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов [Текст] / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов.; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 416 с.
39. Крючков, И.П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов [Текст] / 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.
40. Левин, М.С. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ [Текст] / М.С. Левин, Т.Б. Лещинская // Электричество. – 1999. – № 5. – С. 18–22.
41. Макаров, Д.А. Оценка условий электропоражения в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземлённой нейтралью с учётом обрыва нулевого защитного проводника [Текст] / Д.А. Макаров // Электробезопасность. – 2000. – № 4. – С. 6–13.

42. Макаров, Д.А. Повышение эффективности систем зануления на основе обеспечения первичных критериев электробезопасности: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Д.А. Макаров. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – 116 с.

43. Млоток, А.В. Актуальность разработки защит воздушных линий напряжением 380 В от обрывов фазных и нулевых проводов [Текст] / А.В. Млоток // Материалы ЛШ научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2014. – Ч. IV. – С. 144–150.

44. Млоток, А.В. Принцип выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В [Текст] / А.В. Млоток // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 41–47.

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

46. Млоток, А.В. Основные опасности, возникающие при обрывах фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В [Текст] / А.В. Млоток. – Электробезопасность. – 2014. – № 2. – С. 3–9.

47. Млоток, А.В. Повышение уровня электробезопасности в сетях 0,4 кВ при внедрении системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов [Текст] / А.В. Млоток // Электробезопасность. – 2014. – № 3. – С. 33–37.

48. Многофункциональные микропроцессорные счётчики электроэнергии АЛЬФА / Каталог [Текст]. – М.: «Эльстер Метроника», 2014. – 28 с.

49. Мотуско, Ф.Я. Защитные устройства в электроустановках [Текст] / Ф.Я. Мотуско. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.

50. Никольский, О.К. Системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве [Текст] / О.К. Никольский. – Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1977. – 192 с.

51. Никольский, О.К. Электробезопасность в России на рубеже XXI века [Текст] / О.К. Никольский // Вестник АлтГТУ. – 2000. – № 3. – С. 11–16.

52. Новиков, В.В. Интеллектуальные измерения на службе энергосбережения [Текст] / В.В. Новиков // Энергоэксперт. – 2011. – № 3.

53. Охрименко, В. PLC-технологии. Часть 1 [Текст] / В. Охрименко. – Электронные компоненты. – 2009. – № 10. – С. 58–62.
54. Осик, Л.К. Smart metering – «интеллектуальный учёт» электроэнергии [Текст] / Л.К. Осик // Новости электротехники. – 2011. – № 5(71).
55. PLC-технологии. Безграничный потенциал для управления сетями [Текст] // Новости электротехники. – 2007. – № 5 (47).
56. Петров, Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформатора. Учебник для вузов [Текст] / Г.Н. Петров – М.: «Энергия», 1974. – 240 с.
57. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок [Текст]: утв. приказом Минтруда РФ от 24.07.2013 № 328н. – Екатеринбург: ИД «Урал-ЮрИздат», 2014. – 240 с.
58. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России [Текст]. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003. – 320 с.
59. Пястолов, А.А. Контроль непрерывности цепи зануления коммунально-бытовых установок [Текст] / А.А. Пястолов, А.И. Сидоров, Н.К. Катаева // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 5. – С. 60–61.
60. Рожавский, С.М. Статистические характеристики несимметрии токов и напряжений в сельских сетях 0,4/0,23 кВ [Текст] / С.М. Рожавский, Ю.Ф. Свергун // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. – М.: Изд-во ОНТИ «Сельэнергопроект». – 1971. – № 9. – С. 53–62.
61. Рябинин, А.И. Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно сложных схем [Текст] / А.И. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М: Радио и связь, 1981. – 264 с.
62. Сагутдинов, Р.Ш. Устройство типа УКО для контроля обрывов проводов в электрических сетях напряжением 0,38 кВ [Текст] / Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Красников, А.И. Бутко // Экспресс-информация. Сер. Строительство сельских электросетей. – М.: 1972, вып. 3. – С. 14–15.

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

64. Саидов Р.А. Разработка и исследование устройства для обеспечения непрерывности технологического процесса при неполнофазных режимах погружных электродвигателей с.х. водоснабжения: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.02 [Текст] / Р.А. Саидов. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1981. – 19 с.

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

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

67. Селивахин, А.И. Эксплуатация электрических распределительных сетей [Текст] / А.И. Селивахин, Р.Ш. Сагутдинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 239 с.

68. Семенова, М.Н. Обоснование перехода от глухозаземленного режима нейтрали к изолированной в сетях электроустановок сельскохозяйственного назначения до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 [Текст] / М.Н. Семенова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2011. – 153 с.

69. Серёжин, К.С. Разработка способа и адаптации устройства контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,38кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / К.С. Серёжин. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2010. – 143 с.

70. Серёжин, К.С. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ [Текст] / К.С. Серёжин, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», вып. 11. – 2009. – № 15. – С. 23–26.

71. Сидоров, А.И. Повышение надежности сельских электрических сетей с помощью устройств компенсации токов однофазного замыкания на землю: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 [Текст] / А.И. Сидоров. – Челябинск: ЧПИ, 1984. – 126 с.

72. Сидоров, А.И. Теория и практик системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / А.И. Сидоров. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – 444 с.
73. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: учебное пособие [Текст] / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 344 с.
74. Сидоров, А.И. О защите электрических сетей напряжением 380 В от аварийных режимов [Текст] / А.И. Сидоров, А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток // Материалы VII международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». – Душанбе: ТТУ, 2014. – Ч. I. – С.78–82.
75. Славин, Р.М. Режимы работы и защиты автоматических установок животноводческих ферм [Текст] / Р.М. Славин. – М.: Машиностроение, 1965.
76. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ [Текст]: а.с. № 2356151 Рос. Федерация: МПК Н 02 Н 5/10 / К.С. Серёжин, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров. – № 2008105851/09; заявл. 15.02.08; опубл. 20.05.09. – 4 с.
77. Способ автоматического контроля параметров провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ и устройство для его осуществления [Текст]: пат. № 2295186 Рос. Федерация: МПК Н 02 Н 5/00 / И.Ф. Суворов, К.С. Серёжин, В.В. Гальцев, А.И. Сидоров. – № 2005140871/09; заявл. 26.12.05; опубл. 10.03.07, Бюл. № 7. – 7 с.
78. Спутниковые каналы связи в АСКУЭ. Опыт использования [Текст] // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32).
79. Сталманис, И.С. Исследование и усовершенствование способов защиты низковольтных электрических сетей: автореф. ... канд. техн. наук: 05.14.02 [Текст] / И.С. Сталманис. – Елгава: ЛатСХА, 1970. – 22 с.
80. Суворов, И.Ф. Моделирование электроопасной ситуации в системах электроснабжения с глухозаземлённой нейтралью до 1000 В [Текст] / И.Ф. Суворов // Электробезопасность. – 2005. – № 3. – С. 3–7.

81. Суворов, И.Ф. Развитие теории, разработка методов и средств обеспечения электробезопасности в системах электроснабжения напряжением до 1000 В: дисс ... докт. тех наук: 05.26.01 [Текст] / И.Ф. Суворов. – Челябинск, 2006. – 457 с.
82. 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.
83. Счётчики электрической энергии / Каталог [Текст]. – Ставрополь: ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», 2013. – 32 с.
84. Счётчик активной и реактивной электрической энергии трёхфазный СЕ 303 / Руководство по эксплуатации [Текст]. – Ставрополь: ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», 2012. – 65 с.
85. Счётчик электрической энергии серии NP5 «Матрица» / Описание функций [Текст]. – М.: ООО «Матрица», 2010. – 41 с.
86. 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.
87. Тубинис, В.В. АСКУЭ бытовых потребителей. Преимущества PLC-технологии связи [Текст] / В.В. Тубинис // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32).
88. Тынянский, В.Г. Распознавание режимов работы воздушных линий напряжением 0,4 кВ и электроприёмников: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 [Текст] / В.Г. Тынянский. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 244 с.
89. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов [Текст] / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
90. Устройство для защиты воздушной линии электропередачи от обрыва проводов [Текст]: а.с. № 1206873 СССР. МПК Н 02 Н 5/10 / В.П. Кобазев, Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, Х.М. Желиховский. – № 3717476/24–07; заявл. 02.04.84; опубл. 23.01.86, Бюл. № 3. – 3 с.

91. Устройство для защиты воздушной линии электропередачи от обрыва фазного провода [Текст]: а.с. № 997164 СССР: МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/17 / Х.М. Желиховский, В.П. Кобазев, В.Е. Матвиенко, С.Ф. Капштык. – 2928145/24-07; заявл. 22.05.80; опубл. 15.02.83, Бюл. № 6. – 3 с.

92. Устройство для защиты линии электропередачи [Текст]: а.с. № 1417097 СССР: МПК Н 02 Н 5/10 / В.А. Андреев, И.О. Карпов, А.Л. Дубов, А.Л. Буйми-стер. – № 4181207/24–07; заявл. 12.01.87; опубл. 15.08.1988, Бюл. № 30. – 2 с.

93. Устройство для защиты линии электропередачи с ответвлениями от обрыва фазных проводов [Текст]: а.с. № 1035715 СССР: МПК Н 02 Н 5/10 / Х.М. Желиховский, В.П. Кобазев. – № 3410805; заявл. 24.03.82; опубл. 15.08.83, Бюл. № 30. – 3 с.

94. Устройство для защиты от несимметричного режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью [Текст]: а.с. № 815833 СССР; МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10 / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 2775470/24–07; заявл. 05.06.79; опубл. 28.03.1981, Бюл. № 11. – 3 с.

95. Устройство для защиты от обрыва фазного провода в электрических сетях напряжением 0,38 кВ [Текст]: а.с. № 1210173 СССР: МПК Н 02 Н 5/10 / Р.Ш. Сагутдинов, В.П. Кобазев. – № 3765590/24–07; заявл. 04.07.84; опубл. 07.02.86, Бюл. № 5. – 4 с.

96. Устройство для защиты трёхфазной линии напряжением до 1000 В от обрыва фазных проводов [Текст]: а.с. № 884024 СССР: МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10 / Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Сукманов, В.И. Красников. – № 2895360/24–04; заявл. 19.03.80; опубл. 23.11.81, Бюл. № 43. – 3 с.

97. Устройство для защиты трёхфазной линии напряжением 380 В от обрыва фазных проводов [Текст]: а.с. № 995190 СССР: МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10 / Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Красников, В.Г. Гловацкий. – № 3317197/24–07; заявл. 17.07.81; опубл. 07.02.83, Бюл. № 5. – 3 с.

98. Устройство для защиты участка линии напряжением до 1000 В от обрыва проводов [Текст]: а.с. № 945938 СССР: МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10 / В.И. Сукманов,

Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Красников, А.И.Селивахин. – № 2935891/24–07; заявл. 05.05.80; опубл. 23.07.82, Бюл. № 27. – 6 с.

99. Устройство для защиты электроустановки от обрыва нулевого провода в сети с глухозаземлённой нейтралью [Текст]: а.с. № 854249 СССР: МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10 / Э.Г. Краус, Б.Л. Геллер. – 2842892/07; заявл. 22.11.79; опубл. 07.05.92, Бюл. № 17. – 3 с.

100. Устройство для контроля целостности заземляющей цепи передвижных электроустановок [Текст]: а.с. № 845115 СССР, МКл<sup>3</sup> G 01 R 27/20 / Ю.В. Ситчихин, А.И. Сидоров. № 2792737/18–21; заявл.09.07.79; опубл. 07.07.81; Бюл. № 25. – 2 с.

101. Устройство для определения режима работы электрической сети [Текст]: а.с. № 1050031 СССР; МПК Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10 / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 3275380/24–07; заявл. 10.04.81; опубл. 23.10.83, Бюл. № 39. – 6 с.

102. Устройство для определения режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью [Текст]: а.с. № 1023494 СССР; МПК Н 02 Н 3/16 / А.М. Ершов, О.А. Петров, Ю.В. Исаев. – № 3387655/24–07; заявл. 22.01.82; опубл. 15.06.83, Бюл. № 22. – 6 с.

103. Устройство для токовой защиты участка трёхфазной линии от обрыва одного из фазных проводов [Текст]: а.с. № 714562 СССР: МКл<sup>3</sup> Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/08 / В.И. Сукманов, И.Г. Беляков, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов, Р.Ш. Сагутдинов. – № 2585953/24–07; заявл. 03.03.78; опубл. 05.02.80, Бюл. № 5. – 3 с.

104. 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.

105. Устройство контроля непрерывности нулевого провода в воздушных линиях 0,4 кВ [Текст]: пат. № 2230415 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н 02 Н 5/10, G 01 R 31/02 / Д.А. Апаров, А.И. Сидоров, В.А. Петров, В.В. Дружинин. – № 282002127852/28; заявл.17.10.02; опубл. 10.06.2004. – 5 с.

106. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учебное пособие для вузов [Текст] / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
107. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
108. Щуцкий, В.И. Опыт применения устройств защитного отключения в энергосистемах напряжением до 1000 В [Текст] / В.И. Щуцкий. – М.: Недра, 1970. – 63 с.
109. Ягудаев, В.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / В.М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
110. Якобс, А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве [Текст] / А.И. Якобс, Н.Н. Липантьева // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1975. – № 5.
111. Якобс, А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве [Текст] / А.И. Якобс, А.В. Луковников. М.: Колос, 1981. – 239 с.
112. Blackburn, J. L. Protective Relaying. Principles and Applications [Text] / J. L. Blackburn, T. J Domin, 3<sup>rd</sup> ed. – CRC Press, 2006. – 638 p.
113. Egytien, H.H. Auswertung elektrischer Unafalle. – Elektrotechnische Zeitschrift, 1976. В. 28. № 15.
114. International standart IEC 60364-4-41:2005. Lowvoltage electrical installation. Part 4-41: Protection for safety. Protection against electric shock. Fifthedition. – Geneva: IEC, 2005-12.
115. International standart IEC 60050-195-am1:2001. International Electrotechnical Vocabulary. Part 195: Earting and protection against electric shock. First edition. Amendment 1. – Geneva: IEC, 2001-01.
116. Jakil, Gyurgy. Bevertung von Schutzmaabnahmen gegen gefahrliche Korperstrome. – Elektrotechnische Zeitschrift, 1976. В. 28. № 15.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Физическая модель электрической сети напряжением 220 В

Аналитическое исследование параметров электрической сети напряжением 380 В в различных её точках представляется достаточно трудоемким процессом. Объясняется это тем, что для различных режимов электрической сети необходимо записывать соответствующие уравнения состояния сети и проводить их решение. Кроме того, электрические сети напряжением 380 В характеризуются наличием несимметричной нагрузки, что усложняет математическую модель.

Для изучения различных несимметричных режимов работы электрической сети, апробации различных устройств выявления этих, включая аварийные, режимов и для более четкого понимания физических процессов, протекающих в электрической сети, может быть использовано физическое моделирование.

Физическое моделирование – это вид моделирования, который характеризуется, прежде всего, тем, что исследования проводятся на установках, обладающих физическим подобием, т.е. сохраняющих полностью или хотя бы в основном природу явлений. По характеристикам модели можно получить все характеристики оригинала путём пересчетов с использованием коэффициентов подобия (масштабных коэффициентов) [15].

В лаборатории кафедры «Системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета разработана физическая модель [28, 29], прототипом которой является электрическая сеть напряжением 380 В со следующими параметрами: трансформатор мощность 160 кВА со схемой соединения обмоток  $Y/Y_N$ ; четырехпроводная воздушная линия протяженностью 300 м с проводами марки А-3х70+1х70 мм<sup>2</sup> и тремя повторными заземления нулевого провода; трехфазная электрическая нагрузка, сосредоточенная в конце линии, мощностью 60 кВт и  $\cos\varphi_N = 1$ ; конфигурация сети – радиальная.

Параметры моделируемой электрической сети напряжением 380 В.

1. Характеристики питающей электрической сети напряжением 10 кВ – оригинала.

1.1. Трёхфазный ток  $I_{К.МАКС}^{(3)} = 7$  кА при максимальном режиме работы сети.

1.2. Двухфазный ток  $I_{К.МИН}^{(2)} = 5$  кА при минимальном режиме работы сети.

2. Силовой трансформатор ТМГ-160/10.

2.1. Номинальная мощность трансформатора  $S_{Т.НОМ} = 160$  кВА, напряжения обмоток 10/0,4 кВ.

2.2. Схема соединения обмоток Y/Y<sub>Н</sub>.

2.3. Напряжение короткого замыкания  $U_{К\%} = 4,5$  %.

2.4. Потери короткого замыкания  $\Delta P_{КЗ} = 2650$  Вт.

2.5. Сопротивления трансформатора:

– полное

$$Z_{Т(0)} = \frac{U_{К\%}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{Т.НОМ}} = \frac{4,5}{100} \cdot \frac{400^2}{160 \cdot 10^3} = 0,045 \text{ Ом}; \quad (\text{A.1})$$

– активное

$$R_{Т(0)} = \Delta P_{КЗ} \cdot \frac{U_{Т.НОМ}^2}{S_{Т.НОМ}^2} = 2650 \cdot \frac{400^2}{160^2 \cdot 10^6} = 0,0166 \text{ Ом}; \quad (\text{A.2})$$

– реактивное

$$X_{Т(0)} = \sqrt{Z_{Т(0)}^2 - R_{Т(0)}^2} = \sqrt{45^2 - 8,3^2} \cdot 10^{-3} = 0,04423 \text{ Ом}; \quad (\text{A.3})$$

– отношение сопротивлений

$$\frac{R_{Т(0)}}{X_{Т(0)}} = \frac{0,0166}{0,04423} = 0,375. \quad (\text{A.4})$$

3. Воздушная линия выполнена неизолированными проводами АС-4х70 мм<sup>2</sup>.

3.1. Длина линии 300 м.

3.2. Сопротивления и длина воздушной линии определены по условию допустимого отклонения напряжения  $\Delta U_{ДОП} = 5$  %

$$F_{Л} = \frac{100 \cdot P_{НАГР} \cdot \rho \cdot L}{\Delta U_{ДОП} \cdot U_{НОМ}^2}; \quad (\text{A.5})$$

$$F_{Л} = \frac{100 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,03 \cdot 300}{5 \cdot 400^2} = 67,5 \text{ мм}^2.$$

3.3. Параметры линии  $R_{1.л.уд} = 0,429 \text{ Ом/км}$ ;  $X_{1.л.уд} = 0,294 \text{ Ом/км}$ ;  $I_{дл.доп} = 265 \text{ А}$ ;  $L/R = 0,0022 \text{ Гн/Ом}$

$$\begin{aligned} X_{1.л(0)} &= X_{1.л.уд} \cdot L = 0,294 \cdot 0,3 = 0,0882 \text{ Ом}; \\ R_{1.л(0)} &= R_{1.л.уд} \cdot L = 0,429 \cdot 0,3 = 0,1287 \text{ Ом}; \\ \frac{X_{1.л(0)}}{R_{1.л(0)}} &= \frac{0,0882}{0,1287} = 0,686; \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$Z_{1.л(0)} = \sqrt{X_{1.л(0)}^2 + R_{1.л(0)}^2} = \sqrt{0,1287^2 + 0,0882^2} = 0,156 \text{ Ом}.$$

4. Параметры электрической нагрузки.

4.1. Суммарная трёхфазная нагрузка (принята активной) линии

$$P_{\text{НАГР}} = 60 \text{ кВт} = 3 \cdot 20 \text{ кВт}. \quad (\text{A.7})$$

4.2. Фазное сопротивление нагрузки

$$R_{\text{НАГР}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НАГР}}} = \frac{220^2}{20 \cdot 10^3} = 2,42 \text{ Ом}. \quad (\text{A.8})$$

4.3. Ожидаемый фазный ток нагрузки

$$\begin{aligned} I_{\text{НАГР(0)}} &= \frac{U_{\text{Ф(0)}}}{\sqrt{(R_{\text{НАГР(0)}} + R_{\text{Л(0)}})^2 + X_{\text{Л(0)}}^2}} = \\ &= \frac{220}{\sqrt{(2,42 + 0,0882)^2 + 0,1287^2}} = \frac{220}{2,51} = 87,65 \text{ А}. \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

4.4. Фактическая трехфазная мощность нагрузки

$$P_{\text{НАГР(0)}} = 3 \cdot U_{\text{Ф(0)}} \cdot I_{\text{Ф(0)}} = 3 \cdot 220 \cdot 87,65 = 57,85 \text{ кВт}. \quad (\text{A.10})$$

Параметры силового трансформатора, использованного для питания физической модели электрической сети напряжением 220 В:

1. Тип трансформатора ТС-2,5 – трехфазный; естественное воздушное охлаждение (сухой); схемы соединения обмоток Y/Y<sub>н</sub>. Паспортные данные:

1.1. Напряжения обмоток (линейные) – 380/220 В.

1.2. Номинальная мощность  $S_{\text{Т.НОМ}} = 2,5 \text{ кВА}$ .

1.3. Потери короткого замыкания  $\Delta P_{\text{КЗ}} = 70 \text{ Вт}$ .

1.4. Потери холостого хода  $\Delta P_{\text{ХХ}} = 25 \text{ Вт}$ .

1.5. Напряжение короткого замыкания  $U_{\text{КЗ}} = 4,5 \%$ .

1.6. Ток холостого хода  $I_{\text{ХХ}} = 12 \%$ .

2. Сопротивления трансформатора (модели), приведённые к вторичному линейному напряжению  $U_{Т.НОМ} = U_{Л} = 220$  В – напряжению физической модели электрической сети:

$$\begin{aligned}
 Z_{Т(М)} &= \frac{U_{К\%}}{100} \cdot \frac{U_{Т.НОМ}^2}{S_{Т.НОМ}} = \frac{4,5}{100} \cdot \frac{220^2}{2500} = 0,87 \text{ Ом}; \\
 R_{Т(М)} &= \Delta P_{КЗ} \cdot \frac{U_{Т.НОМ}^2}{S_{Т.НОМ}^2} = 70 \cdot \frac{220^2}{2500^2} = 0,542 \text{ Ом}; \\
 X_{Т(М)} &= \sqrt{Z_{Т(М)}^2 - R_{Т(М)}^2} = \sqrt{0,87^2 - 0,542^2} = 0,680 \text{ Ом}; \\
 \frac{R_{Т(М)}}{X_{Т(М)}} &= \frac{0,542}{0,682} = 0,795; \\
 I_{Т.Н}^{ВН} &= \frac{S_{Т.НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 380} = 3,8 \text{ А}; \\
 I_{Т.Н}^{НН} &= \frac{S_{Т.НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 220} = 6,56 \text{ А}; \\
 I_{К.МАКС}^{(3)НН} &= \frac{I_{Т.Н}^{НН}}{U_{К}} = \frac{6,56}{0,045} = 145,8 \text{ А}.
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

Коэффициенты подобия.

Параметры остальных элементов физической модели электрической сети напряжением 220 В находим через коэффициенты подобия, для чего используем положения, применяемые в теории подобия [15]. В качестве исходных, основных рассмотрим коэффициенты подобия, связывающие напряжения электрических сетей оригинала и модели, а также полные сопротивления соответствующих силовых трансформаторов:

– коэффициент подобия по напряжению

$$m_U = \frac{U_M}{U_O} = \frac{220}{380} = 0,579; \tag{A.12}$$

– коэффициент подобия по сопротивлению

$$m_Z = \frac{Z_{Т(М)}}{Z_{Т(О)}} = \frac{0,87}{0,045} = 19,33. \tag{A.13}$$

С учётом этого получены производные коэффициенты:

– коэффициент подобия по току

$$m_I = \frac{m_U}{m_Z} = \frac{0,579}{19,33} = 0,0299; \quad (\text{A.14})$$

– коэффициент подобия по мощности

$$m_S = \frac{m_U^2}{m_Z} = \frac{0,579^2}{19,33} = 0,0173. \quad (\text{A.15})$$

С помощью полученных коэффициентов подобия определяем:

#### 1. Сопротивления модели линии электропередачи

$$\begin{aligned} X_{Л(М)} &= X_{Л(О)} \cdot m_Z = 0,0882 \cdot 19,33 = 1,705 \text{ Ом}; \\ R_{Л(М)} &= R_{Л(О)} \cdot m_Z = 0,1287 \cdot 19,33 = 2,488 \text{ Ом}; \\ Z_{Л(М)} &= Z_{Л(О)} \cdot m_Z = 0,156 \cdot 19,33 = 3,015 \text{ Ом}; \\ L_{Л(М)} &= \frac{X_{(ЛМ)}}{\omega} = \frac{1,705}{314} = 0,00543 \text{ Гн}. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

#### 2. Сопротивления заземляющих устройств:

– трансформаторной подстанции

$$R_{ЗУ.ТП(М)} = R_{ЗУ.ТП(О)} \cdot m_Z = 4 \cdot 19,33 = 77,32 \text{ Ом}; \quad (\text{A.17})$$

– повторных заземлений нулевого провода воздушной линии

$$R_{П(М)} = R_{П(О)} \cdot m_Z = 30 \cdot 19,33 = 580 \text{ Ом}; \quad (\text{A.18})$$

– потребителя

$$R_{ЗУ.П(М)} = R_{ЗУ.П(О)} \cdot m_Z = 10 \cdot 19,33 = 193,3 \text{ Ом}. \quad (\text{A.19})$$

#### 3. Ожидаемый фазный ток нагрузки физической модели

$$\begin{aligned} I_{НАГР(М)} &= \frac{U_{\Phi(М)}}{\sqrt{(R_{НАГР(М)} + R_{Л(М)})^2 + X_{Л(М)}^2}} = \\ &= \frac{127}{\sqrt{(58 + 2,488)^2 + 1,705^2}} = \frac{127}{60,51} = 2,099 \text{ А}. \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

#### 4. Фактическая трехфазная мощность нагрузки физической модели

$$P_{НАГР(М)} = 3 \cdot U_{\Phi(М)} \cdot I_{\Phi(М)} = 3 \cdot 127 \cdot 2,099 = 799,7 \text{ Вт}. \quad (\text{A.21})$$

#### 5. Соотношение мощностей нагрузки модели и оригинала – фактический ко-

эффициент подобия по мощности

$$m_{S.ФАКТ} = \frac{P_{НАГР(М)}}{P_{НАГР(О)}} = \frac{0,8}{57,85} = 0,0138. \quad (\text{A.22})$$

В таблице А.1 приведены параметры оригинала и физической модели электрической сети, а также фактические  $m_{\text{ФАКТ}}$  и расчётные  $m_{\text{РАСЧ}}$  значения коэффициентов подобия.

Таблица А.1 – Соотношения между параметрами оригинала и модели

Сеть	Электрическая сеть 380 В	Физическая модель 220 В	Фактический коэффициент подобия, $m_{\text{ФАКТ}}$	Расчетный коэффициент подобия, $m_{\text{РАСЧ}}$
Силовой трансформатор				
Тип и марка	ТМГ	ТС		
$S_{\text{Т.НОМ}}$ , кВА	160	2,5	0,0156	0,0173
$X_{\text{Т}}$ , Ом	0,04423	0,680	15,37	–
$R_{\text{Т}}$ , Ом	0,0166	0,542	32,65	–
$Z_{\text{Т}}$ , Ом	0,045	0,87	19,33	19,33
Четырехпроводная воздушная линия АС-3х70+1х70				
$X_{\text{ВЛ}}$ , Ом	0,0882	1,705	19,33	19,33
$R_{\text{ВЛ}}$ , Ом	0,1287	2,488	19,33	19,33
$Z_{\text{ВЛ}}$ , Ом	0,156	3,015	19,33	19,33
Напряжение питания				
$U_{\text{С}}$ , В	380	220	0,579	0,579
Электрическая нагрузка				
$P_{\text{Н}}$ , кВт	57,85	0,80	0,0138	0,0173
$R_{\text{Н}}$ , Ом	2,42	58	23,97	19,33
$I_{\text{Н}}$ , А	87,65	2,1	0,024	0,0299
Заземляющие устройства				
$R_{\text{ЗУ.ТП}}$ , Ом	4	77,32	19,33	19,33
$R_{\text{П}}$ , Ом	30	580	19,33	19,33
$R_{\text{ЗУ.П}}$ , Ом	10	193	19,33	19,33

Описание физической модели.

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

– трансформатор (ТС-2,5/380/220) с заземляющим устройством трансформаторной подстанции ( $R_{\text{ЗУ.ТП}}$ );

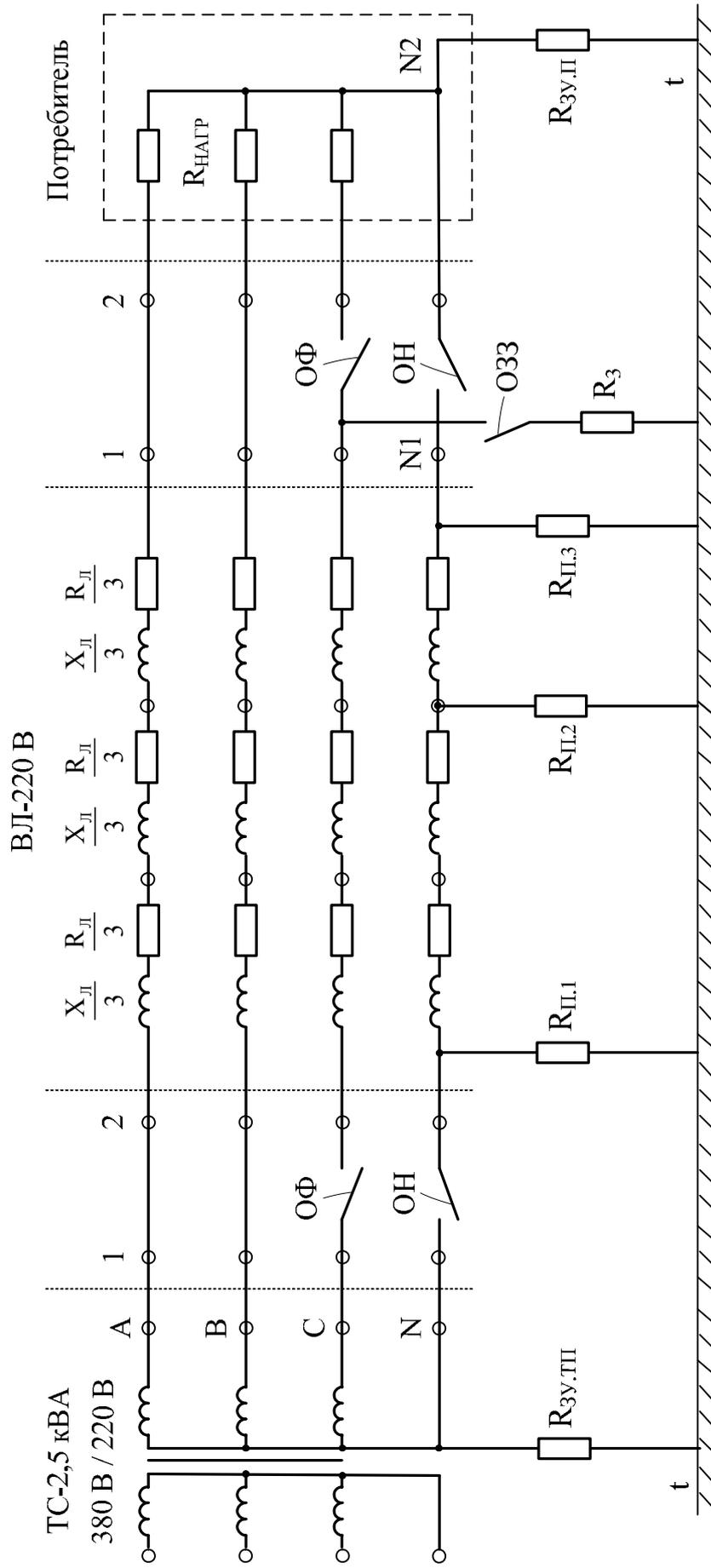


Рисунок А.1 – Принципиальная электрическая схема физической модели четырехпроводной электрической сети напряжением 220 В

- 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 ( $R_{ЗУ.П}$ ).

На рисунке А.2 изображена принципиальная электрическая схема регулируемой нагрузки. Электрическая нагрузка представляет собой набор резисторов, включенных на различных ступенях 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 А.2.

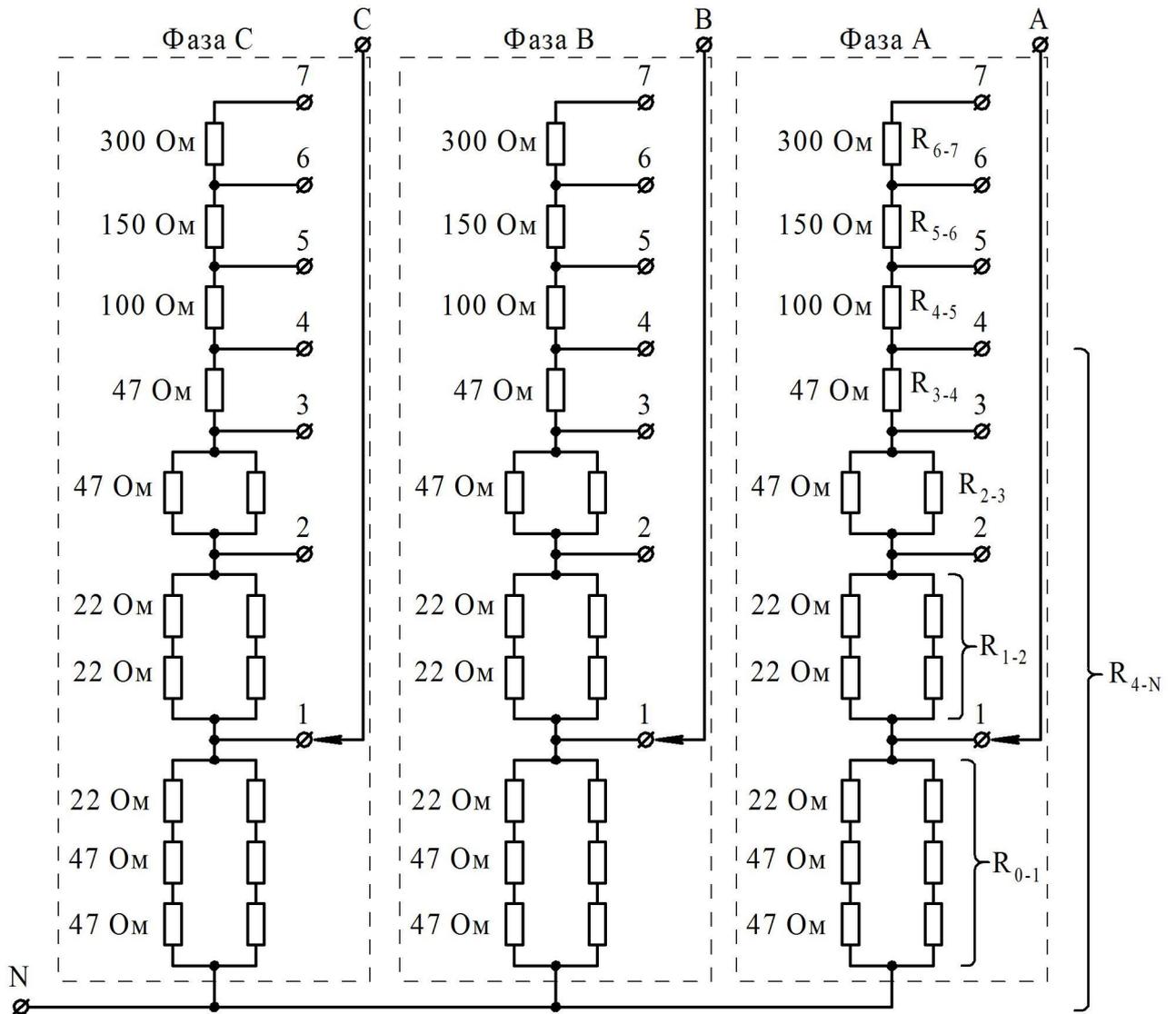


Рисунок А.2 – Принципиальная электрическая схема регулируемой нагрузки

Таблица А.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	$P_{н.э}$ , Вт	$P_{н.э}$ , %
300	700,5	0,18	22,70	7 – N	68,1	8,22
150	400,5	0,32	41,01	6 – N	123,0	14,6
100	250,5	0,51	65,16	5 – N	195,5	23,3
47	150,5	0,85	108,74	4 – N	326,2	38,8
23,5	103,5	1,23	156,59	3 – N	462,15	55,7
22	80	1,59	202,25	2 – N	606,6	72,6
58	58	2,19	278,17	1 – N	834,2	100

Из таблицы А.2 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 при исследованиях на физической модели применяются:

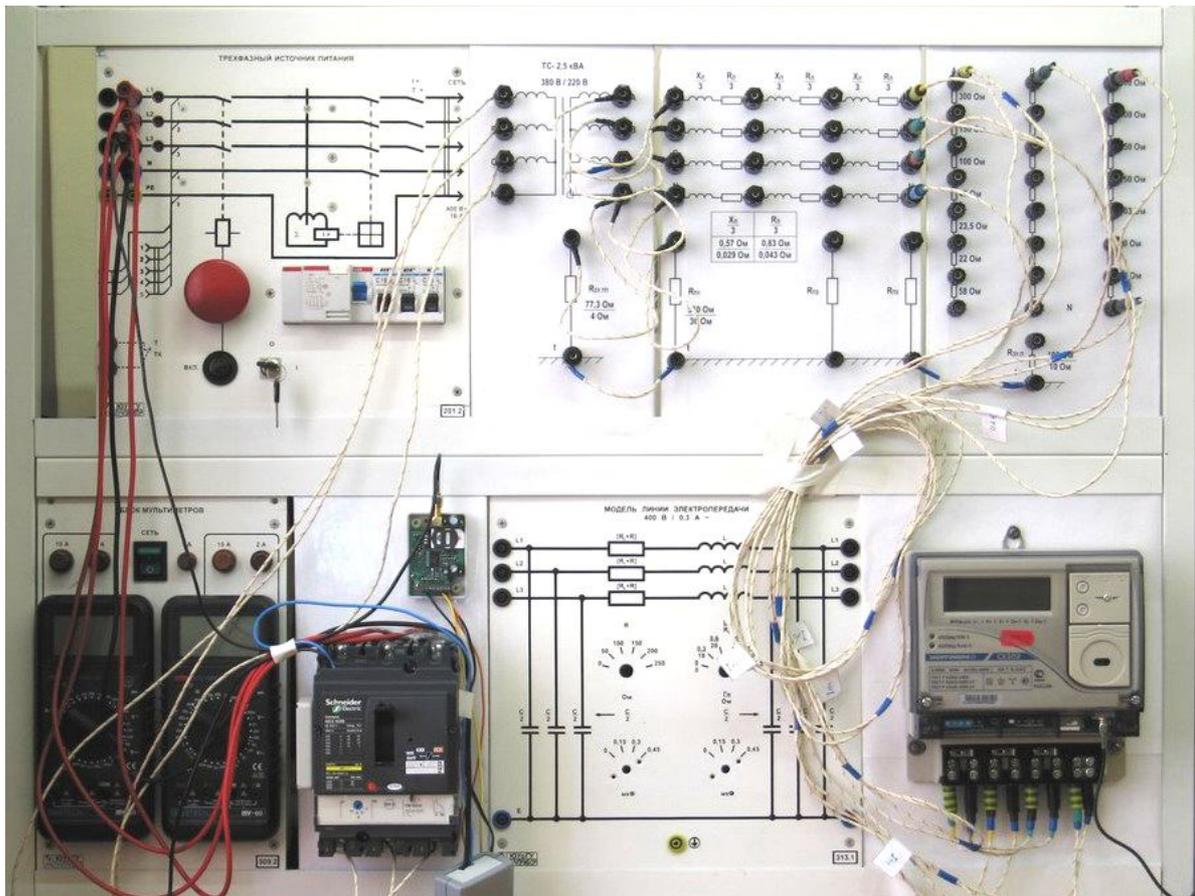
- самопишущий цифровой комплект, например типа «Ресурс-2UF2M», который позволяет производить запись измеряемых параметров с интервалами осреднения 0,02–3–60 с; фиксировать большое количество параметров, в частности, изменения во времени напряжений, токов, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности, симметричных составляющих напряжений и токов;

- самопишущий цифровой осциллограф, например типа АОС-5110, позволяющий фиксировать непрерывные (аналоговые) изменения 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.

На рисунке А.3 представлен внешний вид физической модели электрической сети.



б)

Рисунок А.3 – Вид физической модели с размещением на ней системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии

Возможные направления исследований на физической модели.

На созданной модели возможно проведение следующих исследований:

1. Исследования изменений напряжений и их симметричных составляющих при обрывах фазных (ОФ) и нулевого проводов (ОН);
2. Исследования влияния различных факторов на величину дифференциальных токов в электрической сети с системой заземления TN-C;
3. Исследования однофазных замыканий на землю (ОЗЗ);
4. Разработка, исследование и отладка устройств защиты электрической сети от несимметричных режимов работы, в том числе, устройств выявления обрывов фазных и нулевого проводов.

Первое направление исследований проводится с целью анализа изменения, как векторных величин, напряжений и его симметричных составляющих при обрывах фазных или нулевого проводов, а также разработки новых устройств защиты, выявляющих эти режимы. При этом исследуется влияние следующих факторов:

- несимметрии нагрузки электроприёмников по фазам сети;
- наличие сопротивлений заземляющих устройств в трансформаторной подстанции и у потребителя, сопротивлений повторных заземлителей.

Второе направление исследований проводится с целью анализа возможности применения защит, основанных на выявлении различных дифференциальных токов, полученных путем суммирования трех фазных токов или суммирование трех фазных токов и тока в нулевом проводе. Таковыми могут быть устройства защитного отключения и дифференциальные автоматы. Заметим, в сетях напряжением 380 В на величину указанных дифференциальных токов влияют:

- количество и величина сопротивления повторных заземлений нулевого провода ВЛ;
- величина сопротивления заземляющего устройства у потребителя;
- количество отходящих воздушных линий от подстанции 6–10/0,4 кВ;
- степень несимметрии нагрузки;
- наличие распределенной нагрузки;
- величина сопротивления в месте замыкания при обрыве и падении на грунт фазного провода и т.д.

Третье направление исследований позволяет проанализировать влияние на величину тока однофазного замыкания количества и величины сопротивления повторных заземлений и электрической нагрузки. Кроме того, появляется возможность проверки правильности расстановки средств токовой защиты при секционировании электрической сети.

Четвертое из указанных выше направлений исследований позволяет проводить испытания опытных образцов устройств защиты от обрывов фазных и нулевого проводов.

Таким образом, рассмотренная физическая модели электрической сети дает возможность:

- анализировать работы токовых защит, в частности, построенных с использованием дифференциальных выключателей;

- анализировать работы защит, основанных на использовании информации о напряжениях электрической сети;
- исследовать изменения напряжений несимметрии, симметричных составляющих напряжений сети при обрывах фазных или нулевого проводов, при изменении параметров нагрузки;
- исследовать влияния величины сопротивлений заземляющих устройств на характеристики токов и напряжений при различных режимах работы электрической сети.

Необходимо отметить, что описанная в данной статье физическая модель не дает возможности исследовать все возможные режимы работы электрической сети в виду простоты её конфигурации и делать какие-либо заключительные выводы по тому или иному вопросу. Конечно же, конфигурация физической модели может постоянно меняться и усложняться. Исследование какого-либо физического явления (или процесса) связано с экспериментальными и аналитическими исследованиями, проводимыми совместно или поочередно и взаимно дополняющими друг друга [15]. Поэтому физическая модель даёт нам возможность расширить глубину и объем исследований, а также понять природу тех или иных физических явлений происходящих в реальных действующих электрических сетях.

#### Заключение.

Разработанная физическая модель позволит объединить, дополнить и расширить теоретические исследования, проводимые с использованием компьютерной модели [9, 10, 11], и экспериментальные исследования в реальных электрических сетях напряжением 380 В [8, 27].

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Опытная электрическая сеть напряжением 380 В

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 [9, 10]. 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 [9, 10, 27]:

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 от-

ключаться 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, подключенных 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» [45]. 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 моде-

лировании 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 Б.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 Б.2);

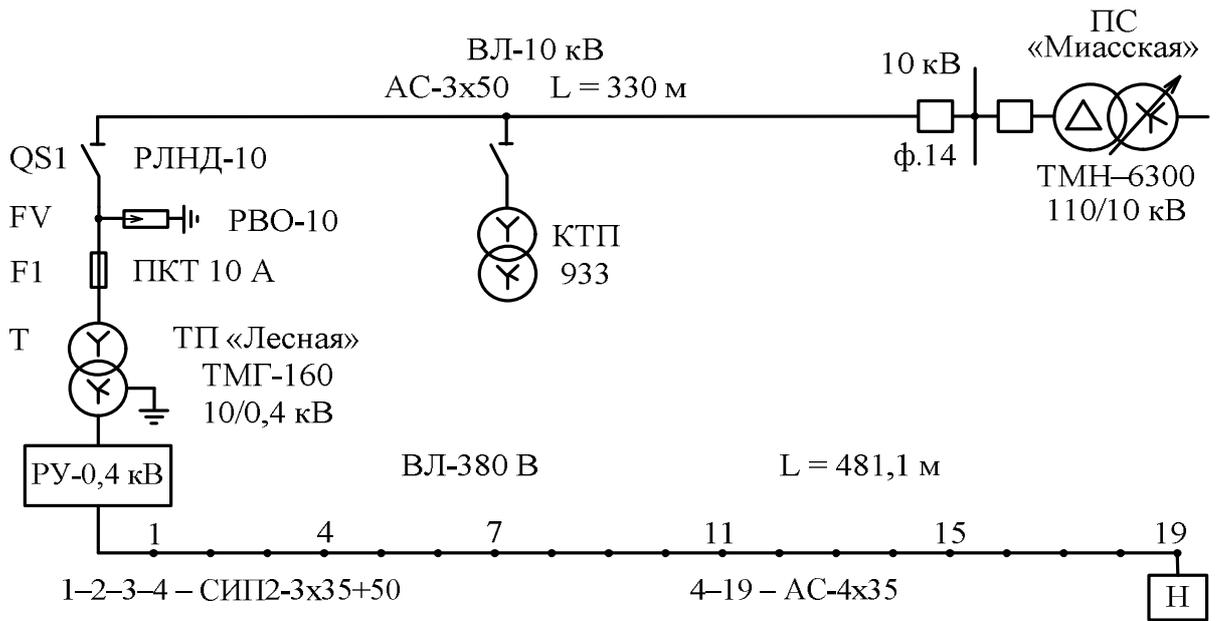


Рисунок Б.1 – Схема питания опытной электрической сети

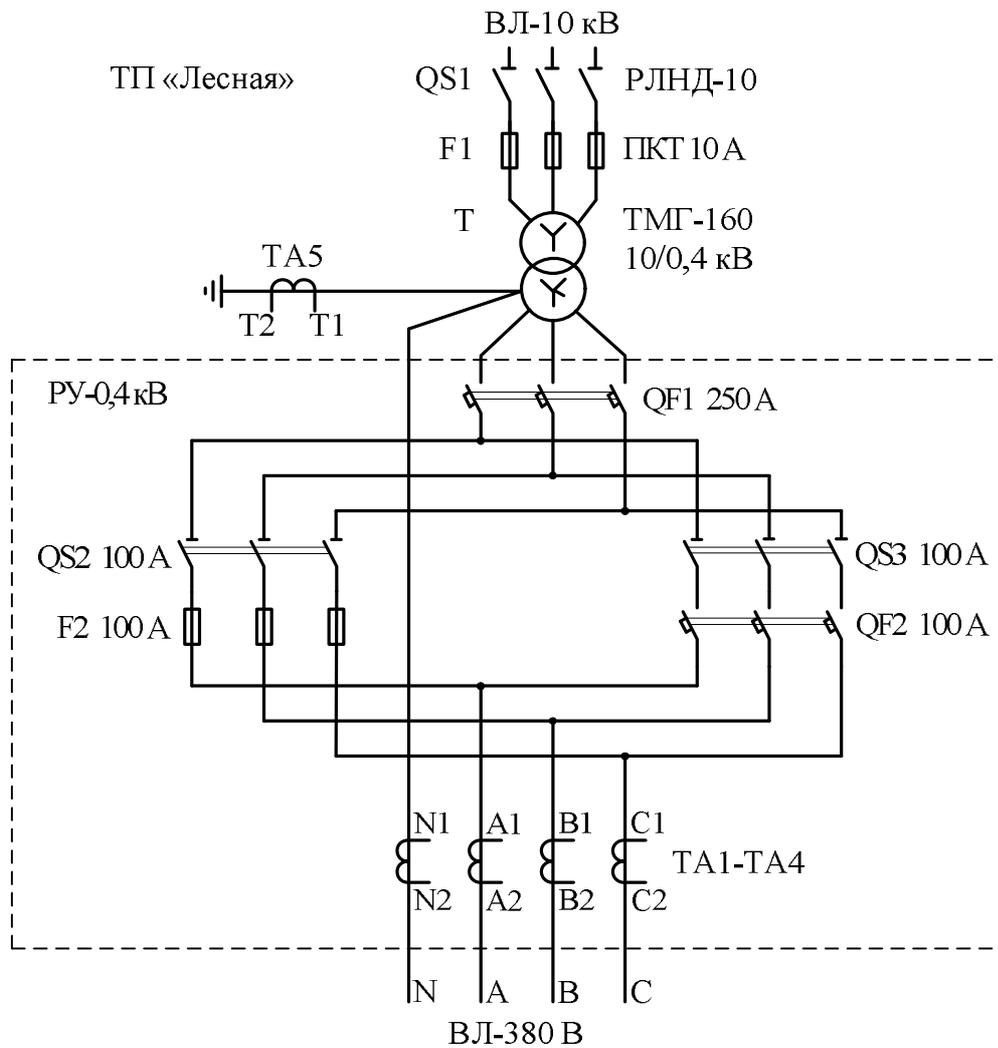


Рисунок Б.2 – Схема распределительного устройства РУ-0,4 кВ подстанции

– от воздушной линии напряжением 380 В предусмотрено питание потребителей электрической энергии, которые обозначены в виде нагрузки Н. Первые три пролёта ВЛ выполнена 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 Б.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 Б.4: а – КТП «Лесная» с начальным участком ВЛ; б, в – середина и конец ВЛ; г – панель распределительного устройства 0,4 кВ КТП.

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

Таблица Б.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





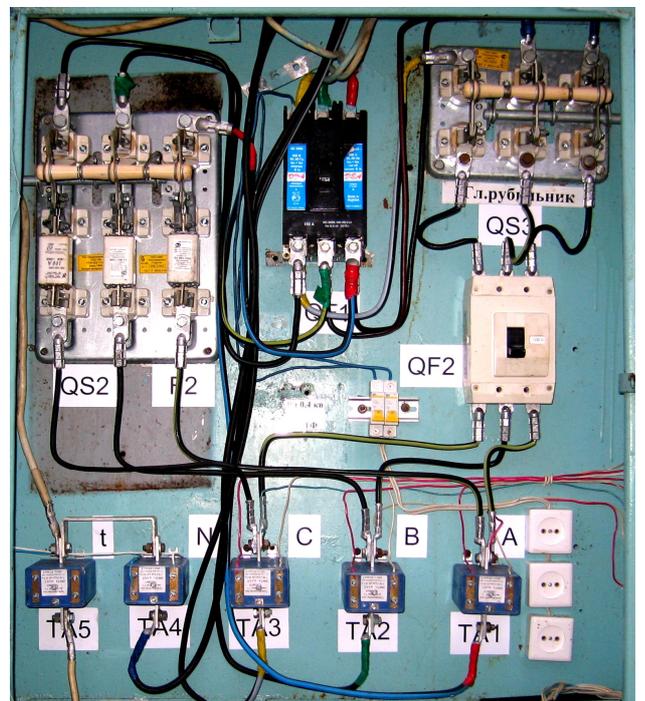
а)



б)



в)



г)

Рисунок Б.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 Б.1 и Б.3). Принципиальная схема ячейки нагрузочных сопротивлений показана на рисунке Б.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 Б.6 показана подробная схема соединения нагрузочных сопротивлений.

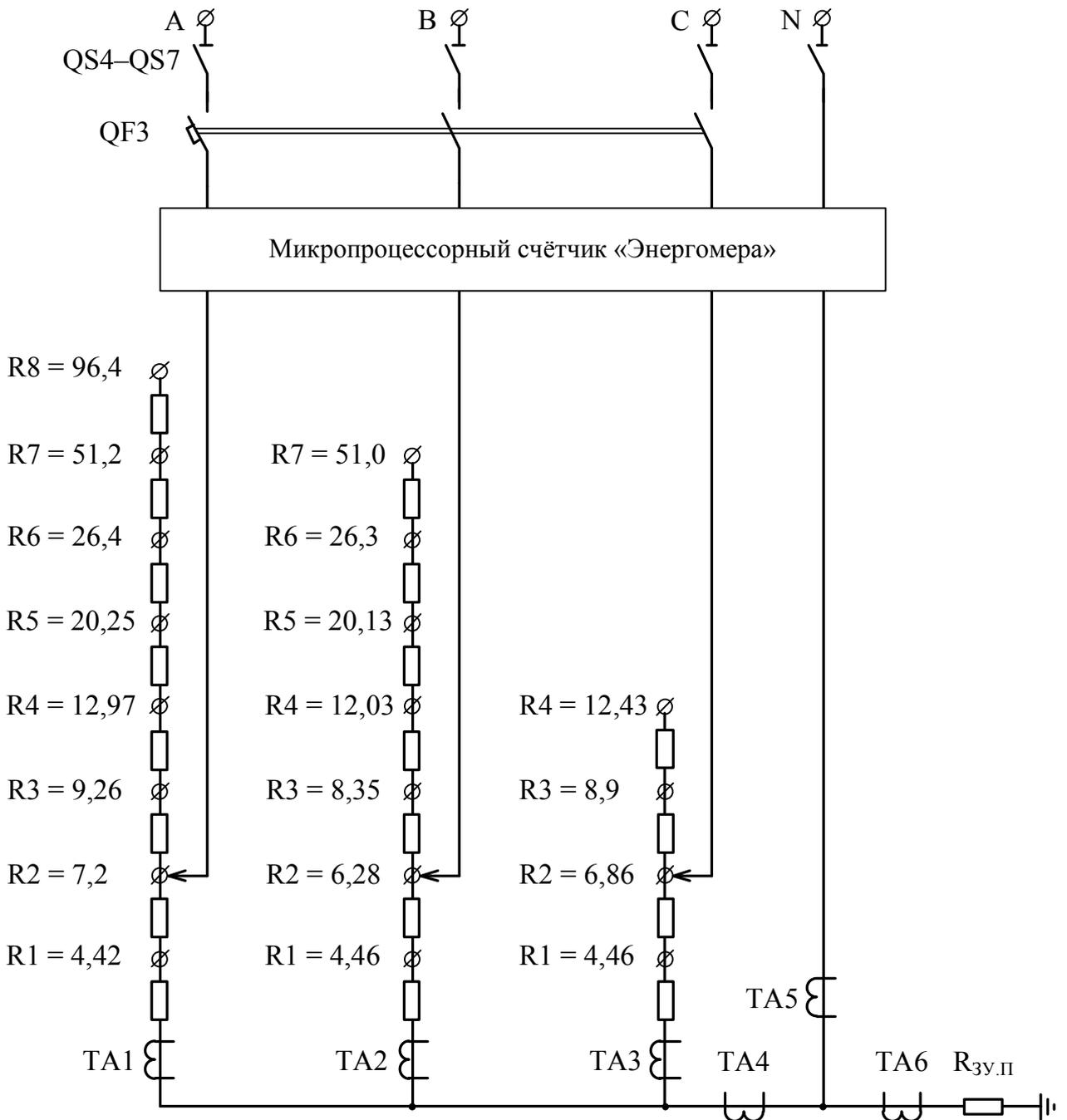


Рисунок Б.5 – Принципиальная схема ячейки нагрузочных сопротивлений

В таблице Б.2 представлены характеристики нагрузочных сопротивлений:

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

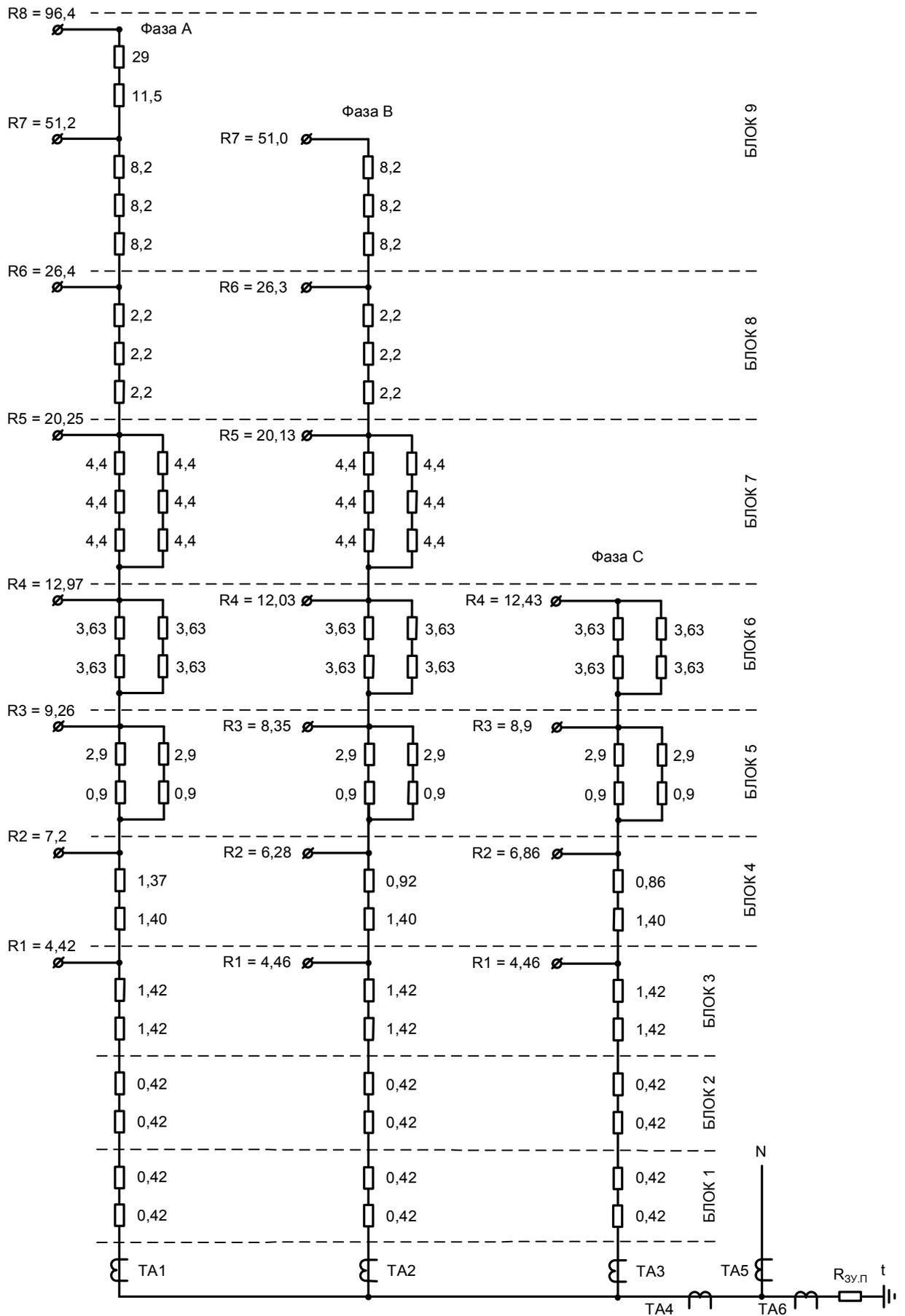


Рисунок Б.6 – Подробная схема соединения нагрузочных сопротивлений

– 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 Б.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 Б.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  $U_{\text{ф.н}} = 220 \text{ В}$ , изменяясь в пределах от нуля до линейного напряжения  $U_{\text{л.н}} = 380 \text{ В}$ . 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  $R_1 = 4,42 \text{ Ома}$  в результате нагрева сопротивление увеличилось до  $4,6 \text{ Ома}$ , т.е. изменение сопротивления составило около  $4 \%$ .

Опытная электрическая сеть в соответствии с требованиями ПУЭ имеет заземляющие устройства в трансформаторной подстанции  $R_{\text{ЗУ.ТП}}$ , повторных заземлений нулевого провода  $R_{\text{П}}$  на опорах воздушной линии и у потребителя  $R_{\text{ЗУ.П}}$  и (рисунок Б.3). В таблице Б.3 представлены результаты выборочных замеров сопротивлений заземляющих устройств трансформаторной подстанции и воздушной линии напряжением  $380$ .

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

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

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

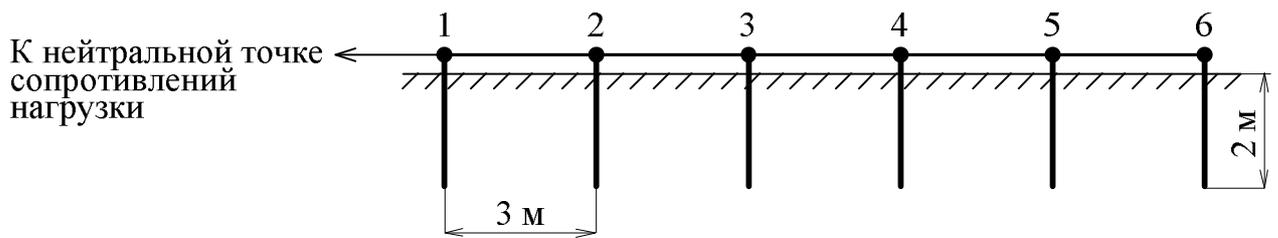


Рисунок Б.7 – Схема исполнения заземляющего устройства потребителя

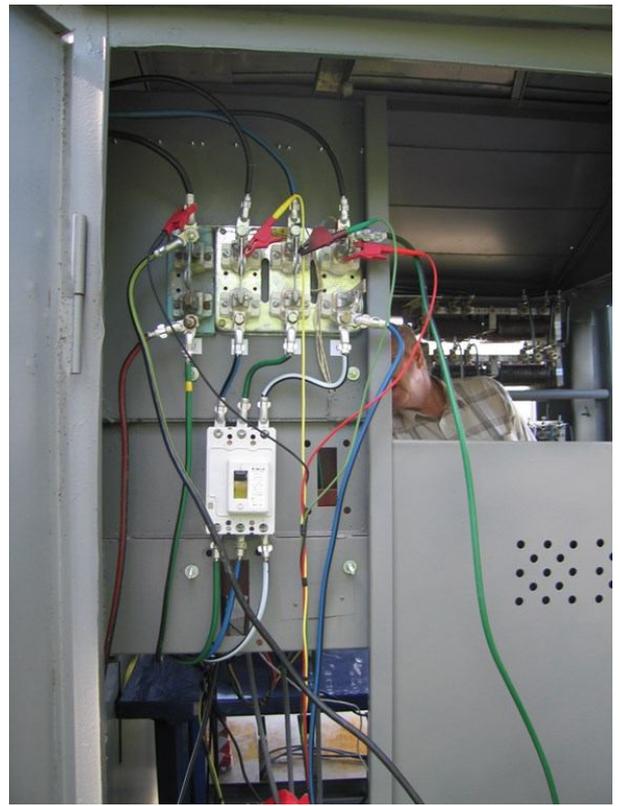
Таблица Б.4 – Сопротивления стержней заземляющего устройства потребителя

№ 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
8	2–5	8,11
9	3–5	10,25
10	4–5	15,80
11	$R_{зу.л} + R_{п} + R_{вл} + R_{зу.тп}$ (замеренное с конца линии)	2,08
12	$R_{зу.л} + R_{п} + R_{вл} + R_{зу.тп}$ (замеренное с начала линии)	2,28

На рисунке Б.8 показаны фотографии ячейки нагрузочных сопротивлений.



а)



б)



в)



г)

Рисунок Б.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 Б.8 – Ячейка нагрузочных сопротивлений: д – блоки нагрузочных резисторов; е – внутренний вид ячейки

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.
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-2UF2М», которые позволяют производить запись измеряемых параметров с интервалами ос-

реднения 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 то-

ков 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 защитам 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 защитам, 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.

### **Заключение**

Совместные натурные, экспериментальные исследования на опытной электрической сети и теоретические исследования с помощью компьютерной модели позволяют взаимно дополнять друг друга. На компьютерной модели имеется возможность широких количественных и качественных исследований, которые невозможно осуществить в реальной сети. В тоже время в опытной электрической сети можно проводить «точечные» эксперименты с имитацией самых различных аварийных ситуаций в электрической сети напряжением 380 В, проверяя и подтверждая результаты теоретических исследований.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты исследований на компьютерной модели изменений напряжений при различных режимах работы электрической сети напряжением 380 В

Таблица В.1 – Результаты измерений параметров электрической сети в нормальном режиме,  $R_{3y.П} = 1 \text{ Ом}$

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{H.МАКС}$			Напряжения у потребителя							
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2.t}$
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град
1	100	100	100	364,6	364,6	364,6	210,5	210,5	210,5	0	0
				26,33	-93,67	146,3	-3,673	-123,7	116,3	0	0
2	80	100	100	369,7	364,6	367,5	219	207,3	209,7	5,291	0,701
				26,28	-93,67	147	-2,718	-122,9	115,2	19,73	-178,5
3	60	100	100	375,8	364,6	370,9	228,2	203,7	209,2	11,02	1,462
				26,25	-93,67	147,8	-1,683	-122	113,9	20,76	-177,4
4	40	100	100	383,2	364,6	374,9	238	199,7	208,8	17,25	2,288
				26,21	-93,67	148,7	-0,558	-121,1	112,5	21,89	-176,3
5	20	100	100	392,3	364,6	379,9	248,6	195,3	208,9	24,03	3,187
				26,21	-93,67	149,9	0,669	-120,2	111	23,12	-175,1
6	0	100	100	403,9	364,6	386,2	260,1	190,3	209,3	31,42	4,167
				26,25	-93,67	151,3	2,009	-119,1	109,3	24,46	-173,7
7	80	80	100	372,1	369,6	367,6	218,3	215,7	206,4	5,396	0,716
				26,9	-93,67	146,9	-3,867	121,9	115,9	-39,88	121,9
8	60	60	100	379,8	375,4	371,7	227	221	201,8	11,49	1,523
				27,5	-93,54	147,6	-4,055	-120	115,4	-38,35	123,5
9	40	40	100	387,9	382,3	377,5	236,9	226,5	196,7	18,4	2,44
				28,13	-93,18	148,2	-4,22	-117,8	114,6	-36,62	125,2
10	20	20	100	396,2	391,3	386,9	248,2	232	191,2	26,28	3,485
				28,78	-92,38	148,8	-4,34	-115,5	113,6	-34,64	127,2
11	0	0	100	404,8	404,8	404,8	261,3	237,5	185,2	35,33	4,685
				29,46	-90,54	149,5	-4,379	-112,8	112,2	-32,35	129,5

Таблица В.2 – Результаты измерений параметров электрической сети в нормальном режиме,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя							
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град
1	100	100	100	364,6	364,6	364,6	210,5	210,5	210,5	0	0
				26,33	-93,7	146,3	-3,673	-123,7	116,3	0	0
2	80	100	100	369,7	364,6	367,5	219,1	207,2	209,7	3,523	2,683
				26,28	-93,7	147	-2,715	-122,9	115,1	29,25	-178
3	60	100	100	375,8	364,6	370,9	228,3	203,6	209,1	7,344	5,592
				26,25	-93,7	147,8	-1,675	-122	113,8	30,29	-177
4	40	100	100	383,2	364,6	374,9	238,3	199,5	208,8	11,5	8,754
				26,21	-93,7	148,7	-0,544	-121,1	112,4	31,42	-175,9
5	20	100	100	392,3	364,6	379,9	249	195	208,8	16,02	12,2
				26,21	-93,7	149,9	0,689	-120,1	110,9	32,66	-174,6
6	0	100	100	403,9	364,6	386,2	260,6	190	209,3	20,96	15,96
				26,25	-93,7	151,3	2,038	-119	109,2	34	-173,3
7	80	80	100	372,1	369,6	367,6	218,3	215,7	206,3	3,595	2,737
				26,9	-93,7	146,9	-3,882	-121,9	115,9	-30,35	122,4
8	60	60	100	379,8	375,4	371,7	227,1	221,1	201,6	7,657	5,831
				27,5	-93,5	147,6	-4,086	-119,9	115,4	-28,82	123,9
9	40	40	100	387,9	382,3	377,5	237,1	226,6	196,4	12,27	9,346
				28,13	-93,2	148,2	-4,268	-117,8	114,6	-27,07	125,6
10	20	20	100	396,2	391,3	386,9	248,6	232,2	190,8	17,55	13,37
				28,78	-92,4	148,8	-4,404	-115,3	113,6	-25,07	127,7
11	0	0	100	404,8	404,8	404,8	261,8	237,7	184,7	23,62	17,98
				29,46	-90,5	149,5	-4,457	-112,6	112,2	-22,75	130

Таблица В.3 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве провода фазы А

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{H,MAX}$			Напряжения у потребителя								
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$	
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	
$R_{3y.П} = 1 \text{ Ом}$												
1	–	100	100	393,1	364,2	378,4	0	189,8	211,8	56,88	4,317	
				26,57	-93,61	150,3		-120	109,9	168,2	-174,6	
2	–	80	100	395,3	368,7	378,9	0	197,4	208	56,32	4,021	
				27,06	-93,6	150,2		-118,9	110,3	172,4	176,2	
3	–	60	100	397,5	373,5	379,4	0	205,4	203,9	55,87	3,86	
				27,6	-93,55	150,2		-117,6	110,7	177	165	
4	–	40	100	399,8	378,6	379,9	0	214,1	199,4	55,57	3,916	
				28,19	-93,47	150,1		-116,3	111,1	-177,9	152,4	
5	–	20	100	402,1	384,2	380,5	0	223,4	194,4	55,48	4,217	
				28,84	-93,34	150,1		-114,8	111,5	-172,4	139,9	
6	–	0,001	100	404,5	390,3	381,1	0	233,3	188,9	55,65	4,778	
				29,56	-93,16	150,1		-113,2	111,9	-166,4	129,1	
$R_{3y.П} = 30 \text{ Ом}$												
7	–	100	100	393,2	364,2	378,5	0	189,5	211,7	56,56	16,53	
				26,57	-93,61	150,3		-119,9	109,8	168,1	-174,1	
8	–	80	100	395,3	368,7	378,9	0	197,1	207,9	56	15,4	
				27,06	-93,6	150,2		-118,8	110,2	172,4	176,7	
9	–	60	100	397,6	373,5	379,4	0	205,3	203,7	55,55	14,82	
				27,6	-93,55	150,2		-117,5	110,6	177	165,4	
10	–	40	100	399,8	378,6	379,9	0	214	199	55,26	15,02	
				28,19	-93,47	150,2		-116,1	111	-177,8	152,8	
11	–	20	100	402,1	384,2	380,5	0	223,4	193,9	55,18	16,18	
				28,84	-93,34	150,1		-114,7	111,4	-172,2	140,4	
12	–	0,001	100	404,5	390,3	381,2	0	233,5	188,3	55,39	18,34	
				29,56	-93,15	150,1		-113	111,8	-168,1	129,6	

Таблица В.4 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве провода фазы В

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{H,MAX}$			Напряжения у потребителя								
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A,N2}$	$U_{B,N2}$	$U_{C,N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$	
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	
$R_{3y,\Pi} = 1 \text{ Ом}$												
1	100	–	100	378,4	393,1	364,2	211,8	0	189,8	56,88	4,317	
				30,27	-93,43	146,4	-10,11		120	48,22	65,43	
2	80	–	100	382,7	392,7	367,4	220,2	0	188,9	60,95	4,089	
				30,08	-93,38	147	-8,96		118,6	46,01	76,11	
3	60	–	100	387,4	392,2	370,6	229,2	0	188,3	65,54	3,98	
				29,91	-93,32	147,6	-7,7		117,2	44,09	88,55	
4	40	–	100	392,6	391,6	374	238,9	0	188	70,67	4,04	
				29,76	-93,27	148,4	-6,36		115,5	42,49	102,2	
5	20	–	100	398,3	391	377,5	249,2	0	188,2	76,4	4,3	
				29,64	-93,21	149,2	-4,88		113,8	41,2	116,1	
6	0,001	–	100	404,5	390,3	381,1	260,3	0	188,9	82,75	4,778	
				29,56	-93,16	150,1	-3,28		111,9	40,24	129,1	
$R_{3y,\Pi} = 30 \text{ Ом}$												
7	100	–	100	378,5	393,2	364,2	211,7	0	189,5	56,56	16,53	
				30,28	-93,43	146,4	-10,25		120,1	48,09	65,89	
8	80	–	100	382,7	392,7	367,4	220,2	0	188,5	60,69	15,66	
				30,09	-93,37	147	-9,09		118,7	45,82	76,57	
9	60	–	100	387,4	392,2	370,7	229,4	0	187,9	65,34	15,26	
				29,91	-93,32	147,6	-7,83		117,2	43,86	89,02	
10	40	–	100	392,6	391,6	374,1	239,1	0	187,5	70,55	15,49	
				29,76	-93,26	148,4	-6,47		115,6	42,22	102,7	
11	20	–	100	398,2	391	377,6	249,6	0	187,6	76,37	16,5	
				29,64	-93,21	149,2	-4,988		-66,25	40,91	116,6	
12	0,001	–	100	404,5	390,3	381,2	260,9	0	188,3	82,83	18,34	
				29,56	-93,15	150,1	-3,37		111,8	39,94	129,6	

Таблица В.5 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве провода фазы С,  $R_{ЗУ.П} = 1 \text{ Ом}$

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя							
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град
1	100	100	–	364,2	378,4	393,1	189,8	211,8	0	56,88	4,317
				28,39	-89,73	146,6	-0,02	-130,1		-71,78	-54,57
2	80	100	–	368,7	378,9	395,3	197,4	208	0	56,32	4,021
				26,4	-89,77	147,1	1,12	-129,7		-67,58	-63,75
3	60	100	–	373,5	379,4	397,5	205,4	203,9	0	55,87	3,86
				26,45	-89,81	147,6	2,37	-129,3		-62,98	-75
4	40	100	–	378,6	379,9	399,8	214,1	199,4	0	55,57	3,916
				26,53	-89,85	148,2	3,72	-128,9		-57,93	-87,64
5	20	100	–	384,3	380,5	402,1	223,4	194,4	0	55,48	4,217
				26,66	-89,89	148,8	5,198	-128,5		-52,42	-100,1
6	0,001	100	–	390,3	381,1	404,5	233,3	188,9	0	55,65	4,778
				26,84	-89,93	149,6	6,8	-128,1		-46,43	-110,9
7	100	100	–	364,2	378,4	393,1	189,8	211,8	0	56,88	4,317
				28,39	-89,73	146,6	-0,02	-130,1		-71,78	-54,57
8	80	80	–	371,7	383,1	394,9	196,5	216,4	0	60,27	3,66
				26,97	-89,95	147,1	-0,19	-128,5		-70,03	-52,83
9	60	60	–	379,5	388	396,9	204	220,9	0	64,02	2,915
				27,58	-90,15	147,7	-0,34	-126,8		-68,07	-50,86
10	40	40	–	387,5	393,2	399,2	212,6	225,4	0	68,17	2,069
				28,21	-90,3	148,2	-0,46	-124,9		-65,85	-48,64
11	20	20	–	395,8	398,7	401,7	222,3	229,6	0	72,76	1,1
				28,87	-90,4	148,9	-0,5	-122,8		-63,3	-46,12
12	0,001	0,001	–	404,5	404,5	404,5	233,5	233,5	0	77,84	0
				29,56	-90,44	149,6	-0,44	-120,4		-60,44	

Таблица В.6 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве провода фазы С,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя							
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град
1	100	100	–	364,2	378,5	393,2	189,5	211,7	0	56,56	16,53
				26,39	-89,72	146,6	0,088	-130,2		-71,91	-54,11
2	80	100	–	368,7	378,9	395,3	197,1	207,9	0	56	15,4
				26,4	-89,76	147,1	1,247	-129,8		-67,64	-63,29
3	60	100	–	373,5	379,4	397,6	205,3	203,7	0	55,55	14,82
				26,45	-89,8	147,6	2,5	-129,4		-62,95	-74,55
4	40	100	–	378,6	379,9	399,8	214	199	0	55,26	15,02
				26,53	-89,85	148,2	3,865	-129		-57,81	-87,16
5	20	100	–	384,2	380,5	402,1	223,4	193,9	0	55,18	16,18
				26,66	-89,89	148,8	5,348	-128,6		-52,19	-99,61
6	0,001	100	–	390,3	381,2	404,5	233,5	188,3	0	55,39	18,34
				26,85	-89,93	149,6	6,967	-128,2		-46,06	-110,4
7	100	100	–	364,2	378,5	393,2	189,5	211,7	0	56,56	16,53
				26,39	-89,72	146,6	0,088	-130,2		-71,91	-54,11
8	80	80	–	371,7	383,1	395	196,2	216,3	0	59,99	14,02
				26,97	-89,95	147,1	-0,1	-128,6		-70,16	-52,35
9	60	60	–	379,5	388	397	203,7	220,9	0	63,79	11,18
				27,58	-90,14	147,7	-0,2765	-126,9		-68,17	-50,37
10	40	40	–	387,5	393,2	399,2	212,3	225,4	0	68	7,947
				28,21	-90,29	148,2	-0,415	-125		-65,93	-48,13
11	20	20	–	395,8	395,8	401,7	222,2	229,6	0	72,67	4,246
				28,87	28,87	148,9	-0,484	-122,8		-63,37	-45,57
12	0,001	0,001	–	404,5	404,5	404,5	233,5	233,5	0	77,84	0
				29,56	-90,44	149,6	-0,439	120,4		-60,44	-42,64

Таблица В.7 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве нулевого провода,  $R_{3У.П} = 1 \text{ Ом}$

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя							
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град
1	100	100	100	364,6	364,6	364,6	210,5	210,5	210,5	-	-
				26,33	-93,7	146,3	-3,67	-124	116,3	-	-
2	80	100	100	369,7	364,6	367,5	226,9	205,4	204,3	13,31	3,145
				26,28	-93,7	147	-3,25	-121	113,5	-3,018	175
3	60	100	100	375,6	364,6	370,7	246	200	198	28,87	6,819
				26,24	-93,7	147,8	-2,76	-117	110,1	-2,527	175,5
4	40	100	100	382,7	364,6	374,6	268,5	194,3	191,7	47,27	11,17
				26,21	-93,7	148,7	-2,18	-113	105,6	-1,947	176,1
5	20	100	100	391,1	364,6	379,2	295,6	188,7	186,3	69,39	16,39
				26,21	-93,7	149,7	-1,48	-107	99,9	-1,248	176,8
6	0	100	100	401,4	364,6	384,8	328,7	183,8	182,9	96,45	22,27
				26,25	-93,7	151	-0,63	-99,8	92,5	-0,394	177,6
7	80	80	100	372,1	369,6	367,6	220,9	222,1	198	14,1	3,332
				26,9	-93,7	146,9	-6,05	-120	116,5	-63,19	114,8
8	60	60	100	379,8	375,2	371,4	234,8	237,1	181,4	32,86	7,762
				27,5	-93,6	147,6	-9,1	-116	116,8	-62,86	115,2
9	40	40	100	387,9	381,8	376,6	245,6	258	158,2	59,03	13,94
				28,13	-93,3	148,2	-13	-111	117,1	-62,41	115,6
10	20	20	100	396,2	389,8	384,2	286	289,7	123,6	98,06	23,16
				28,78	-92,7	148,9	-18,1	-105	117,5	-61,73	116,3
11	0	0	100	404,8	400,4	396,6	342,2	343,8	66,35	162,5	38,39
				29,46	-91,5	149,5	-24,6	-96,9	117,4	-60,6	117,4

Таблица В.8 – Результаты измерений параметров электрической сети при обрыве нулевого провода,  $R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$

№ опыта	Нагрузка фаз % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя							
	А	В	С	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_0$	$U_{N2,t}$
				В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град	В/ град
1	100	100	100	364,6	364,6	364,6	210,5	210,5	210,5	0	0
				26,33	-93,7	146,3	-3,65	-124	116,3	0	0
2	80	100	100	369,7	364,6	367,5	228	204,7	203,5	14,98	13,52
				26,28	-93,7	147	-3,26	-120	113,1	-3,261	176,5
3	60	100	100	375,8	364,6	370,9	249,5	198,5	196,4	32,76	29,57
				26,24	-93,7	147,8	-2,77	-116	109	-2,776	177
4	40	100	100	383,1	364,6	374,9	274	192,3	189,5	54,21	48,94
				26,21	-93,7	148,7	-2,19	-111	103,7	-2,19	177,6
5	20	100	100	392,2	364,6	379,8	305	186,5	184	80,59	72,75
				26,21	-93,7	149,9	-1,46	-104	96,6	-1,47	178,3
6	0	100	100	403,5	364,6	386	344	182,5	182,2	113,8	102,7
				26,25	-93,7	151,3	-0,58	-94,6	87,26	-0,563	179,2
7	80	80	100	732,1	369,6	367,6	223,2	223,2	196,2	16	14,44
				26,9	-93,7	146,9	-119,9	-120	116,5	-63,45	116,3
8	60	60	100	379,8	375,4	371,6	240,4	240,4	176,3	38,08	34,38
				27,5	-93,6	147,6	-115,3	-115	116,8	-63,15	116,6
9	40	40	100	387,9	382,2	377,4	266,1	266,1	147,2	70,53	63,67
				28,13	-93,2	148,2	-109,5	-110	117,3	-62,71	117
10	20	20	100	396,2	391,1	386,4	308,9	308,9	100,1	122,9	110,9
				28,78	-92,4	148,8	-101,9	-102	118	-61,99	117,8
11	0	0	100	404,8	404,1	403,4	394,1	394,1	11,51	221,4	199,8
				29,46	-90,7	149,5	-91,55	-91,6	119,1	-60,64	119,1

Таблица В.9 – Изменение напряжения нулевой последовательности  $U_0$  и напряжения нулевого провода относительно земли  $U_{N,t}$  при сопротивлении заземляющего устройства  $R_{ЗУ,П} = \infty$

Ре- жим рабо- ты	Изменения нагрузки по фазам	На- пряже- ния, В	Нагрузка фаз, % $P_{H,МАКС}$					
			0	20	40	60	80	100
НР	$P_{H,A} = \text{var}$	$U_0$	34,19	26,21	18,85	12,07	5,8	0
		$U_{N,t}$	18,31	14,03	10,09	6,463	3,107	0
	$P_{H,A} =$ $P_{H,B} = \text{var}$	$U_0$	37,88	28,41	19,99	12,53	5,9	0
		$U_{N,t}$	20,32	15,21	10,7	6,71	3,163	0
ОФА	$P_{H,B} = \text{var}$	$U_0$	55,35	55,14	55,21	55,5	55,95	56,52
		$U_{N,t}$	20,33	17,93	16,64	16,42	17,07	18,31
ОФВ	$P_{H,A} = \text{var}$	$U_0$	82,84	76,36	70,53	65,31	60,65	56,5
		$U_{N,t}$	20,33	18,28	17,17	16,91	17,36	18,31
ОФС	$P_{H,A} = \text{var}$	$U_0$	55,35	55,14	55,21	55,5	55,95	56,52
		$U_{N,t}$	20,33	17,93	16,64	16,42	17,07	18,31
	$P_{H,A} =$ $P_{H,B} = \text{var}$	$U_0$	77,84	72,66	67,97	63,75	59,95	56,52
		$U_{N,t}$	0	4,708	8,81	12,39	15,54	18,31
ОН	$P_{H,A} = \text{var}$	$U_0$	116,7	82,45	54,34	33,38	15,24	0
		$U_{N,t}$	116,7	82,45	55,32	33,37	15,23	0
	$P_{H,A} =$ $P_{H,B} = \text{var}$	$U_0$	233,5	127,4	72,52	38,94	16,3	0
		$U_{N,t}$	233,4	127,4	72,49	38,93	16,3	0

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты исследований на компьютерной модели режимов работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями

Таблица Г.1

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Напряжения					$R_{3y.II}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2.t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
1	100	100	100	210,5	210,5	210,5	0	0	
				-3,61	-123,6	116,4			
2	99	100	100	210,9	210,3	210,4	0,276	0,035	1
				-3,56	-123,6	116,3	21,2	179,3	
	80	100	100	218,6	207,1	210,2	5,72	0,735	
				-2,56	-123	115,3	22,2	-179,7	
	60	100	100	227,2	203,4	210,1	11,89	1,527	
				-1,43	-122,3	114,1	23,35	-178,6	
	40	100	100	236,5	199,4	210,3	18,57	2,385	
				-0,207	-121,6	112,8	24,58	-177,3	
	20	100	100	246,4	194,9	210,9	25,79	3,31	
				1,12	-120,8	111,4	25,9	-176	
1	100	100	256,5	190,2	211,9	33,23	4,27		
			2,49	-120,1	110	27,3	174,6		
3	100	100	100	210,5	210,5	210,5	0	0	1
				-3,61	-123,6	116,4			
	99	99	100	210,8	210,7	210,3	0,2761	0,036	
				-3,61	-123,5	116,4	-38,76	119,3	
	80	80	100	218,3	215,1	206,7	5,821	0,748	
				-3,65	-121,9	115,9	-37,3	120,8	
	60	60	100	227	219,9	202,7	12,34	1,584	
				-3,67	-120	115,7	-35,58	122,5	
	40	40	100	236,9	224,6	198,4	19,65	2,52	
				-3,63	-118	114,4	-33,66	124,4	
	20	20	100	247,9	229,2	193,8	27,9	3,58	
				-3,51	-115,7	113,3	-31,48	126,6	
	1	1	100	259,9	233,3	189,3	36,73	4,72	
				-3,98	-113,3	112	-29,13	129	

Таблица Г.2

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3У.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2.t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
2	99	100	100	210,9	210,3	210,4	0,2787	0,113	10
				-3,56	-123,6	116,3	21,03	179,6	
	80	100	100	218,6	207,1	210,1	5,779	2,35	
				-2,56	-123	115,3	22,03	-179,4	
	60	100	100	227,3	203,4	210	12,02	4,89	
				-1,43	-122,3	114	23,16	-178,2	
	40	100	100	236,7	199,3	210,3	18,77	7,634	
				-0,2	-121,5	112,7	24,39	-177	
	20	100	100	246,7	194,7	210,9	26,09	10,61	
				1,14	-120,7	111,3	25,72	-175,7	
	1	100	100	256,9	190	211,8	33,62	13,67	
				2,51	-120	109,9	27,1	-174,3	
3	99	99	100	210,8	210,7	210,3	0,2789	0,113	
				-3,61	-123,5	116,4	-38,95	119,7	
	80	80	100	218,3	215,2	206,7	5,884	2,393	
				-3,67	-121,9	115,9	-37,49	121,1	
	60	60	100	227,1	219,9	202,5	12,48	5,074	
				-3,69	-120	115,2	-35,77	122,8	
	40	40	100	237	224,6	198,1	19,89	8,09	
				-3,67	-117,9	114,4	-33,83	124,8	
	20	20	100	248,2	229,3	193,4	28,26	11,49	
				-3,57	-115,6	113,3	-31,63	127	
	1	1	100	260,3	233,4	188,8	37,24	15,15	
				-3,365	-113,2	111,9	-29,26	129,4	
2	99	99	100	210,9	210,3	210,4	0,2795	0,1354	30
				-3,56	-123,6	116,3	20,97	179,7	
	80	80	100	218,6	207,1	210,1	5,796	2,35	
				-2,56	-122,9	115,3	21,97	-179,3	
	60	60	100	227,3	203,4	210	12,06	5,84	
				-1,42	-122,2	114	23,11	-178,1	
	40	40	100	236,8	199,2	210,2	18,83	9,121	
				-0,195	-121,7	112,7	24,34	-176,9	
	20	20	100	246,8	194,7	210,8	26,17	10,61	
				1,139	-120,7	111,3	25,67	-175,6	
	1	1	100	257,1	189,9	211,8	33,73	16,34	
				2,516	-120	109,8	27,05	-174,2	

Таблица Г.3

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3У.П}$
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
3	99	99	100	210,8	210,7	210,3	0,2767	0,135	30
				-3,614	-123,5	116,4	-39	119,8	
	80	80	100	218,3	215,2	206,6	5,902	2,86	
				-3,67	-121,9	115,9	-37,54	121,2	
	60	60	100	227,2	219,9	202,5	12,52	6,063	
				-3,7	-120	115,2	-35,82	122,9	
	40	40	100	237,1	224,7	198,1	19,96	9,67	
				-3,68	-117,9	114,4	-33,88	124,9	
	20	20	100	248,3	229,3	193,3	28,37	13,74	
				-3,58	-115,6	113,3	-31,67	127,1	
	1	1	100	260,4	233,5	188,7	37,39	18,11	
				-3,384	-113,2	111,9	-29,3	129,5	
2	99	100	100	210,9	210,3	210,4	0,28	0,15	∞
				-3,56	-123,6	116,3	20,94	179,8	
	80	100	100	218,6	207,1	210,1	5,807	3,11	
				-2,56	-122,9	115,3	21,94	-179,2	
	60	100	100	227,4	203,3	210	12,08	6,47	
				-1,42	-122,2	114	23,08	-178,1	
	40	100	100	236,8	199,2	210,2	18,87	10,11	
				-0,193	-121,5	112,7	24,31	-176,8	
	20	100	100	246,9	194,6	210,8	26,23	14,05	
				1,14	-120,7	111,3	25,65	-175,5	
	1	100	100	257,1	189,8	211,8	33,81	18,11	
				2,52	-119,9	109,8	27,02	-174,1	
3	99	99	100	210,8	210,7	210,3	0,2803	0,15	∞
				-3,614	-123,5	116,4	-39,04	119,8	
	80	80	100	218,4	215,2	206,6	5,914	3,17	
				-3,674	-121,9	115,9	-37,57	121,3	
	60	60	100	227,2	219,9	202,5	12,54	6,72	
				-3,707	-120	115,2	-35,85	123	
	40	40	100	237,1	224,7	198	20,01	10,71	
				-3,69	-117,9	114,4	-33,9	125	
	20	20	100	248,4	229,3	193,3	28,44	15,23	
				-3,6	-115,6	113,3	-31,7	127,2	
	1	1	100	260,5	233,5	188,6	37,48	20,07	
				-3,396	-113,1	111,9	-29,32	129,5	

Таблица Г.4

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Напряжения					$R_{3y.II}$	
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2.t}$		
	A	B	C	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
4	0	100	100	257,1	190	212	33,63	4,32	1	
				2,56	-120	109,9	27,35	-174,6		
	0	1	100	260,4	233	189,3	36,96	4,748		
				-3,22	-113,3	111,9	-28,51	129,6		
5	0	1	1	234	233,1	233,5	0,4587	0,059		
				-0,38	-120,4	119,4	38,53	-163,4		
4	0	100	100	257,5	189,7	211,9	34,03	13,84		10
				2,59	-119,9	109,8	27,17	-174,2		
	0	1	100	260,9	233,1	188,9	37,48	15,24		
				-3,28	-113,2	111,8	-28,65	130		
5	0	1	1	234	233,1	233,5	0,466	0,1896		
				-0,38	-120,4	119,4	38,46	-162,9		
4	0	100	100	257,6	189,6	211,9	34,15	16,54	30	
				2,59	-119,9	109,8	27,12	-174,1		
	0	1	100	261	233,2	188,8	37,62	18,22		
				-3,3	-113,1	111,8	-28,68	130,1		
5	0	1	1	234	233,1	233,5	0,468	0,227		
				-0,39	-120,4	119,4	38,44	-162,8		
4	0	100	100	257,7	189,6	211,9	34,22	18,33		$\infty$
				2,6	-119,9	109,7	27,09	-174		
	0	1	100	261,1	233,2	188,7	37,72	20,2		
				-3,31	-113,1	111,8	-28,7	130,2		
5	0	1	1	234	233,1	233,5	0,4697	0,252		
				-3,38	-120,4	119,4	38,46	-162,9		
6	0	0	100	260,5	233,5	189	37,23	4,78	1	
				-3,28	-113,3	111,9	-29	129,1		
	0	0	1	234	233,6	233,2	0,4593	0,059		
				-0,47	-120,4	119,5	-21,41	136,7		
6	0	0	100	261	233,6	188,6	37,75	15,35	10	
				-3,35	-113,1	111,8	-29,13	129,5		
	0	0	1	234,1	233,6	233,2	0,4667	0,19		
				-0,47	-120,3	119,5	-21,48	137,1		
6	0	0	100	261,1	233,7	188,5	37,89	18,36	30	
				-3,37	-113	111,8	-29,17	129,6		
	0	0	1	234,1	233,6	233,2	0,4688	0,2271		
				-0,47	-120,3	119,5	-21,5	137,3		

Таблица Г.5

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{н.макс}$			Напряжения					$R_{з.п}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	A	B	C	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
6	0	0	100	261,2	233,7	188,4	37,99	20,35	$\infty$
				-3,38	-113	111,8	-29,19	129,7	
	0	0	1	234,1	233,6	233,2	0,4702	0,252	
				-0,47	-120,3	119,5	-21,51	137,4	
Обрыв провода фазы А в конце ВЛ									
7	0	100	100	0	190	212	56,92	4,32	1
					-120	109,9	168,2	-174,6	
	0	1	100	0	233	189,3	55,68	4,748	
					-113,3	111,9	-166,7	129,6	
8	0	1	1	0	233,1	233,5	77,64	0,06	
					-120,4	119,4	179,4	-163,4	
7	0	100	100	0	189,7	211,9	56,68	13,84	10
					-119,9	109,8	168,1	-174,2	
	0	1	100	0	233,1	188,9	55,47	15,24	
					-113,2	111,8	-166,5	130	
8	0	1	1	0	233,1	233,5	77,63	0,19	
					-120,4	119,4	179,4	-162,9	
7	0	100	100	0	189,6	211,9	56,61	16,54	30
					-119,9	109,8	168,1	-174,1	
	0	1	100	0	233,2	188,8	55,41	18,22	
					-113,1	111,8	-166,4	130,1	
8	0	1	1	0	233,1	233,5	77,63	0,227	
					-120,4	119,4	179,4	-162,8	
7	0	100	100	0	189,6	211,9	56,56	18,33	$\infty$
					-119,9	109,7	168,1	-174	
	0	1	100	0	233,2	188,7	55,37	20,2	
					-113,1	111,8	-166,3	130,2	
8	0	1	1	0	233,1	233,5	77,63	0,25	
					-120,4	119,4	179,4	-162,7	
Обрыв провода фазы В в конце ВЛ									
7	100	0	100	212	0	190	56,92	4,32	1
				-10,1		120	48,22	63,436	
	1	0	100	260	0	189	82,48	4,75	
				-3,37		112	40,28	128,5	
8	1	0	1	233,5	0	233,1	77,64	0,06	
				-0,56		119,6	59,4	76,61	

Таблица Г.6

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Напряжения					$R_{3y.П}$	
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2.t}$		
	A	B	C	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
7	100	0	100	211,9	0	189,7	56,68	13,84	10	
				-10,2		120,1	48,12	65,79		
	1	0	100	260,4	0	188,5	82,54	15,26		
				-3,43		111,9	40,04	128,9		
8	1	0	1	233,5	0	233,1	77,63	0,19		
				-0,56		119,6	59,4	77,18		
7	100	0	100	211,9	0	189,6	56,61	16,54		30
				-10,25		120,1	48,1	65,9		
	1	0	100	260,5	0	188,4	82,56	18,24		
				-3,45		111,9	40	129		
8	1	0	1	233,5	0	233,1	77,63	0,227		
				-0,56		119,6	59,4	77,21		
7	100	0	100	211,9	0	189,6	56,56	18,33	$\infty$	
				-10,27		120,1	48,1	65,96		
	1	0	100	260,6	0	188,3	82,57	20,2		
				-3,47		111,9	40	129,1		
8	1	0	1	233,5	0	233,1	77,63	0,25		
				-0,56		119,6	59,4	77,3		
9	0	0	100	0	233,5	189	55,7	4,78		1
					-113,2	111,9	-166,4	129,1		
	0	0	1	0	233,6	233,2	77,59	0,06		
					-120,4	119,5	179,7	136,7		
9	0	0	100	0	233,6	188,6	55,49	15,35	10	
					-113,1	111,8	-166,1	129,5		
	0	0	1	0	233,6	233,2	77,58	0,19		
					-120,3	119,5	179,7	137,1		
9	0	0	100	0	233,7	188,5	55,43	18,36	30	
					-113	111,8	-166,1	129,6		
	0	0	1	0	233,6	233,2	77,58	0,23		
					-120,3	119,5	179,7	137,3		
9	0	0	100	0	233,7	188,4	55,39	18,36	$\infty$	
					-113	111,8	-166	129,6		
	0	0	1	0	233,6	233,2	77,58	0,23		
					-120,3	119,5	179,7	137,3		

Таблица Г.7

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{ЗУ.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
10	0	0	100	0	0	189	63,01	4,78	1
						111,9	111,9	129,1	
	0	0	1	0	0	233,2	77,73	0,06	
						119,5	119,5	136,7	
10	0	0	100	0	0	188,6	62,86	15,35	10
						111,8	111,8	129,5	
	0	0	1	0	0	233,2	77,72	0,19	
						119,5	119,5	137,1	
10	0	0	100	0	0	188,5	62,82	18,36	30
						111,8	111,8	129,6	
	0	0	1	0	0	233,2	77,72	0,227	
						119,5	119,5	137,3	
10	0	0	100	0	0	188,4	62,79	18,36	$\infty$
						111,8	111,8	129,6	
	0	0	1	0	0	233,2	77,72	0,25	
						119,5	119,5	137,4	
12	100	100	100	210,5	210,5	210,5	0	0	1
				-3,61	-123,6	116,4			
	99	100	100	211,2	210,2	210,2	0,619	0,1478	
				-3,59	-123,5	116,3	-3,33	174,5	
	1	100	100	326,7	184	183	94,77	22,63	
				-0,57	-100,2	93,04	-31,06	177,6	
13	99	99	100	210,9	211	209,9	0,6206	0,148	
				-3,72	-123,5	116,4	-63,3	114,5	
	1	1	100	338	339,7	70,56	157,8	37,68	
				-24,5	-97,31	117,5	-60,53	117,3	
12	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,6748	0,512	10
				-3,59	-123,5	116,3	-3,56	175,8	
	1	100	100	340,5	182,9	182,1	107,7	81,64	
				-0,55	-96,35	89,14	-0,52	178,8	
13	99	99	100	210,9	211	209,9	0,6767	0,513	
				-3,73	-123,4	116,4	-63,57	115,8	
	1	1	100	372,9	374,5	32,34	198,8	150,6	
				-27,91	-93,41	118,7	-60,71	118,6	

Таблица Г.8

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3У.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
12	100	100	100	210,5	210,5	210,5	0	0	30
				-3,61	-123,6	116,4			
	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,6923	0,626	
				-3,359	-123,5	116,2	-3,59	176,1	
	1	100	100	345	182,6	182,1	111,9	101,2	
				-0,52	-95,06	87,85	-0,51	179,2	
13	99	99	100	211	211	209,8	0,6943	0,628	
				-3,73	-123,4	116,4	-63,6	116,1	
	1	1	100	386,9	387,9	17,78	214,4	193,8	
				-29,14	-92,05	119,2	-60,64	119,1	
12	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,7044	0,7044	$\infty$
				-3,59	-123,5	116,2	-3,59	176,4	
	1	100	100	348,2	182,4	182,2	114,9	114,9	
				-0,49	-94,16	86,94	-0,49	179,5	
13	99	99	100	211	211	209,8	0,7065	0,7065	
				-3,74	-123,4	116,4	-63,6	116,4	
	1	1	100	397,6	398	6,852	226,1	226,1	
				-29,98	-91,07	119,5	-60,54	119,5	
14	0	100	100	328,5	183,8	182,9	96,26	22,99	1
				-0,52	-99,82	92,62	-0,26	177,6	
	0	1	100	340,9	340,4	68,77	159,8	38,15	
				-23,99	-96,9	116,3	-59,94	117,9	
15	0	1	1	239	230,7	231	5,398	1,289	
				-0,4	-119,4	118,4	1,58	179,5	
14	0	100	100	342,6	182,7	182,1	109,4	82,98	10
				-0,5	-95,86	88,65	-0,47	178,9	
	0	1	100	376,9	375,9	29,69	201,7	153	
				-27,85	-92,91	115,3	-60,12	119,2	
15	0	1	1	249,1	226,1	226,3	15,46	11,73	
				-0,41	-117,1	116,1	0,14	179,5	
14	0	100	100	347,3	182,4	182,1	113,8	102,9	30
				-0,47	-94,54	87,32	-0,46	179,3	
	0	1	100	393,1	389,6	14,81	217,7	196,8	
				-29,07	-91,5	111,9	-60,04	119,7	
15	0	1	1	266,1	219	219,2	32,41	29,3	
				-0,42	-113,1	112,2	-0,25	179,5	

Таблица Г.9

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3У.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
14	0	100	100	350,6	182,3	182,3	116,9	116,9	$\infty$
				-0,44	-93,61	86,39	-0,44	179,6	
	0	1	100	402,4	399,9	3,999	229,8	229,8	
				-29,91	-90,51	89,49	-59,94	120,1	
15	0	1	1	350,6	202,2	202,2	116,9	116,9	
				-0,44	-90,47	89,53	-0,44	179,6	
16	0	0	100	341,7	343,3	66,85	162	38,68	1
				-24,4	-96,84	117,4	-60,46	117,4	
	0	0	1	236,6	236,5	228	5,524	1,32	
				-1,56	-119,3	119,5	-58,38	119,5	
16	0	0	100	378,6	379,9	26,86	204,9	155,4	10
				-28,34	-92,8	118,7	-60,6	118,7	
	0	0	1	242,5	242,3	217	16,55	12,55	
				-3,8	-117	119,5	-59,83	119,5	
16	0	0	100	393,4	394,1	11,53	221,3	200,1	30
				-25,59	-91,45	119,2	-60,5	119,2	
	0	0	1	254,6	254,5	195,9	37,62	34,01	
				-7,76	-113,1	119,5	-60,23	119,5	
16	0	0	100	404,8	404,8	0	233,7	233,7	$\infty$
				-30,44	-90,44		-60,44	119,6	
	0	0	1	404,8	404,8	0	233,7	233,7	
				-30,44	-90,44		-60,44	119,6	
17	0	100	100	0	183,8	182,9	13,25	22,99	1
					-99,82	92,62	177,6	177,6	
	0	1	100	0	340,4	68,77	95,1	38,15	
					-96,9	116,3	-104,5	117,9	
18	0	1	1	0	230,7	231	74,28	1,289	
					-119,4	118,4	179,5	179,5	
17	0	100	100	0	182,7	182,1	4,781	82,98	10
					-95,86	88,65	178,9	178,9	
	0	1	100	0	375,9	29,69	116,7	153	
					-92,91	115,3	-95,21	119,2	
18	0	1	1	0	226,1	226,3	67,57	11,73	
					-117,1	116,1	179,5	179,5	

Таблица Г.10

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3У.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
17	0	100	100	0	182,4	182,1	1,976	102,9	30
					-94,54	87,32	179,3	179,3	
	0	1	100	0	389,6	14,81	125,3	196,8	
					-91,51	111,9	-92,41	119,7	
18	0	1	1	0	219	219,2	56,27	0,6352	
					-113,1	112,2	179,5	179,5	
17	0	100	100	0	182,3	182,3	0	116,9	$\infty$
					-93,61	86,39	180	179,6	
	0	1	100	0	399,9	3,999	132	229,8	
					-90,51	89,49	-90,51	120,1	
18	0	1	1	0	202,2	202,2	0	116,9	
					-90,47	89,53	180	179,5	
19	0	0	100	0	343,3	66,85	96,83	38,68	1
					-96,84	117,4	-104,3	117,4	
	0	0	1	0	236,3	228	75,98	1,32	
					-119,3	119,5	-178,1	119,5	
19	0	0	100	0	379,9	26,86	119,1	155,4	10
					-92,84	118,7	-95,1	118,7	
	0	0	1	0	242,3	217	72,88	12,55	
					-117	119,5	-172,9	119,5	
19	0	0	100	0	394,1	11,53	128,1	200,1	30
					-91,45	119,2	-92,32	119,5	
	0	0	1	0	254,5	195,9	68,77	34,01	
					-113,1	119,5	-162,1	119,5	
19	0	0	100	0	404,8	0	134,9	233,7	$\infty$
					-90,44		-90,44	119,6	
	0	0	1	0	404,8	0	134,9	233,7	
					-90,44		-90,44	119,6	
20	0	0	100	0	0	66,85	22,28	38,68	1
						117,4	117,6	117,4	
	0	0	1	0	0	228	76,01	1,32	
						119,5	119,5	119	
20	0	0	100	0	0	26,86	8,953	155,4	10
						118,7	118,7	118,7	
	0	0	1	0	0	217	72,33	12,55	
						119,5	119,5	119,5	

Таблица Г.11

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
21	0	100	100	0	190	211,8	56,75	19,38	10
					-119,9	109,8	168,3	-175,2	
	0	1	100	0	233,5	188,7	55,64	19,46	
					-113,2	111,9	-166,3	142,8	
	0	1	1	0	233,5	233,3	77,74	5,49	
					-120,4	119,5	179,6	179,8	
21	0	100	100	0	189,9	211,7	56,66	23,07	30
					-119,9	109,8	168,2	-175,1	
	0	1	100	0	235,5	188,6	55,54	23,2	
					-113,1	111,8	-166,2	142,9	
	0	1	1	0	233,4	233,3	77,77	6,54	
					-120,4	119,5	179,6	179,9	
21	0	100	100	0	189,8	211,7	56,6	25,49	$\infty$
					-119,9	109,8	168,2	-175	
	0	1	100	0	233,5	188,5	55,47	25,61	
					-113,1	111,8	-166,2	142,9	
	0	1	1	0	233,4	233,3	77,68	7,23	
					-120,4	119,5	179,5	180	
Замыкание на землю через сопротивление $R_{033} = 100$ Ом									
22	100	100	100	0,073	190	212	56,9	4,29	1
					5,43	-120	109,9	168,2	
	1	100	100	2,729	190	212	56,05	4,31	
					5,43	-120	109,9	167,9	
	1	1	100	3	233	189,3	55,25	4,74	
					-50,4	-113,3	111,9	-165,8	
1	1	1	0,037	233,1	233,5	77,62	-163,4		
				16,61	-120,4	119,4	179,4	-163,4	
22	100	100	100	0,23	189,7	211,9	56,61	13,52	10
					5,77	-119,9	109,8	168,1	
	1	100	100	8,69	189,7	211,9	53,93	13,72	
					5,78	-119,9	109,8	167,2	
	1	1	100	9,57	233,1	188,9	54,13	15,1	
					-50	-113,2	111,8	-163,4	
1	1	1	0,12	233,1	233,5	77,59	0,19		
				-17,1	-120,4	119,4	179,4	-162,9	

Таблица Г.12

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y}$ П
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
22	100	100	100	0,3	189,6	211,9	56,48	17,76	$\infty$
				5,93	-119,9	109,7	168	-174,1	
	1	100	100	11,47	189,6	211,9	52,94	18,11	
				5,95	-119,9	109,7	166,8	-174,1	
	1	1	100	12,65	233,2	188,7	53,69	130,1	
				-49,85	-113,1	111,8	-162,3	130,1	
1	1	1	0,16	233,1	233,5	77,68	0,25		
			17,28	-120,4	119,4	179,4	-162,7		
Замыкание на землю через сопротивление $R_{O33} = 100$ Ом									
23	99	100	100	211,2	210,2	210,2	0,617	0,15	1
				-3,59	-123,5	116,3	-3,32	174,5	
	1	100	100	326,3	184	183,1	94,4	23,05	
				-0,57	100,3	93,15	-0,3	177,5	
	1	1	100	337,1	338,8	71,56	156,7	38,27	
				-23,93	-97,4	117,4	-60,5	117,3	
0,99	1	1	233,5	233,4	233,4	0,051	0,013		
			-0,47	-120,5	119,5	1,57	179,4		
23	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,674	0,52	10
				-3,59	-123,5	116,3	-3,56	175,8	
	1	100	100	340,4	182,9	182,1	107,6	82,18	
				-0,55	-96,37	89,16	-0,52	178,8	
	1	1	100	372,8	374,4	32,5	198,6	151,7	
				-27,9	-93,43	118,7	-60,71	118,6	
0,99	1	1	233,6	233,4	233,4	0,144	0,11		
			-0,47	-120,4	119,5	0,08	179,4		
23	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,704	0,704	$\infty$
				-3,59	-123,5	116,2	-3,59	176,4	
	1	100	100	348,2	182,4	182,2	114,9	114,9	
				-0,49	-94,16	86,94	-0,49	179,5	
	1	1	100	397,6	398	6,85	226,1	226,1	
				-29,93	-91,07	119,5	-60,54	119,5	
0,99	1	1	234,2	233,1	233,1	0,780	0,780		
			-0,47	-120,3	119,4	-0,47	179,5		

Таблица Г.13

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,II}$
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
Замыкание на землю через сопротивление $R_{O33} = 100 \text{ Ом}$									
24	99	100	100	211,2	210,2	210,2	0,618	0,147	1
				-3,59	-123,5	116,3	-3,33	174,5	
	1	100	100	326,6	184	183	94,73	22,45	
				-0,57	-100,2	93,05	-0,31	177,6	
	1	1	100	337,9	339,6	70,67	157,7	37,37	
				-24,03	-97,03	117,5	-60,5	117,3	
0,99	1	1	233,5	233,4	233,4	0,052	0,012		
			-0,47	-120,5	119,5	1,52	179,4		
24	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,6727	0,5	10
				-3,59	-123,5	116,3	-3,56	175,7	
	1	100	100	339,9	182,9	182,1	107,1	79,35	
				-0,55	-96,5	89,3	-0,517	178,8	
	1	1	100	371,4	373	33,99	197	145,9	
				-27,77	-93,6	118,7	-60,7	118,6	
0,99	1	1	233,6	233,4	233,4	0,1368	0,1		
			-0,47	-120,4	119,5	0,13	179,4		
24	99	100	100	211,3	210,2	210,1	0,7004	0,68	$\infty$
				-3,59	-123,5	116,3	-3,59	-3,59	
	1	100	100	347,2	182,4	182,1	113,9	110,4	
				-0,5	-94,45	87,24	-0,5	179,4	
	1	1	100	394	394,6	10,49	222,2	215,3	
				-29,7	-91,4	119,4	-60,6	119,3	
0,99	1	1	234	233,2	233,2	0,5	0,49		
			-0,47	-120,4	119,4	-0,44	179,5		
25	100	100	100	0	269,8	272,4	133,8	17,2	1
					-141,7	133,8	175,8	-26	
	1	100	100	0	269,8	272,4	133,8	17,2	
					-141,7	133,8	175,8	-26	
	80	80	100	0	278	271,4	135,3	17,37	
					-140,8	134,4	177,4	-24,5	
	1	1	100	0	314,7	266,2	141,9	18,23	
					-136,9	137	-175,5	-17,45	
	80	80	80	0	279,5	279,6	139,2	17,87	
					-141,3	135,3	177	-25	
	1	1	1	0	326,5	311,1	164,4	21,11	
					-139,4	141,9	-177,7	-19,57	

Таблица Г.14

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y.П}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2.t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
25	100	100	100	0	270,2	273,1	134,3	54,61	10
					-141,8	133,9	175,8	-25,6	
	1	100	100	0	270,2	273,1	134,3	54,61	
					-141,8	133,9	175,8	-25,6	
	80	80	100	0	278,4	272,1	135,8	55,22	
					-141	134,5	177,3	-24	
	1	1	100	0	315,3	267	142,5	57,96	
					-137,1	137,1	-175,6	-16,97	
	80	80	80	0	280	280,4	139,7	56,81	
					-141,5	135,3	176,9	-24,5	
	1	1	1	0	327,2	312,1	165,2	67,16	
					-139,6	142	-177,7	-19,1	
25	100	100	100	0	270,2	273,1	134,5	72,05	$\infty$
					-141,8	133,9	175,7	-25,4	
	1	100	100	0	270,2	273,1	134,5	72,05	
					-141,8	133,9	175,7	-25,4	
	80	80	100	0	278,4	272,1	136	72,85	
					-141	134,5	177,3	-23,8	
	1	1	100	0	315,3	267	142,8	76,48	
					-137,1	137,1	-175,6	-16,75	
	80	80	80	0	280	280,4	139,9	74,95	
					-141,5	135,3	176,9	-24,28	
	1	1	1	0	327,2	312,1	165,5	88,64	
					-139,6	142	-177,7	-18,87	
26	100	100	100	0	0	276,1	92,05	11,82	1
						116,2	116,2	-85,7	
	1	100	100	0	0	276,1	92,05	11,82	
						116,2	116,2	-85,7	
	80	80	100	0	0	276,1	92,05	11,82	
						116,2	116,2	-85,7	
	1	1	100	0	0	276,1	92,05	11,82	
						116,2	116,2	-85,7	
	80	80	80	0	0	283,6	94,54	12,14	
						117	117	-84,95	
	1	1	1	0	0	317	105,7	13,57	
						120,4	120,4	-81,48	

Таблица Г.15

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y.II}$
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2.t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
26	100	100	100	0	0	276,5	92,16	37,48	10
						116,2	116,2	-85,2	
	1	100	100	0	0	276,5	92,16	37,48	
						116,2	116,2	-85,2	
	80	80	100	0	0	276,5	92,16	37,48	
						116,2	116,2	-85,2	
	1	1	100	0	0	276,5	92,16	37,48	
						116,2	116,2	-85,2	
	80	80	80	0	0	284	94,67	38,5	
						116,9	116,9	-84,44	
	1	1	1	0	0	317,4	105,8	43,03	
						120,4	120,4	-80,97	
26	100	100	100	0	0	276,7	92,22	49,39	$\infty$
						116,2	116,2	-84,97	
	1	100	100	0	0	276,7	92,22	49,39	
						116,2	116,2	-84,97	
	80	80	100	0	0	276,7	92,22	49,39	
						116,2	116,2	-84,97	
	1	1	100	0	0	276,7	92,22	49,39	
						116,2	116,2	-84,97	
	80	80	80	0	0	284,2	94,73	50,73	
						116,9	116,9	-84,2	
	1	1	1	0	0	317,7	105,9	56,71	
						120,4	120,4	-80,73	
27	100	100	100	105,2	105,2	210,5	0	0	1
				-63,61	-63,61	116,4			
	1	100	100	121,2	121,2	200,7	15,7	2,02	
				-59,48	-59,48	114	-34,7	123,4	
	80	80	100	111,2	111,2	206,7	5,821	0,75	
				-62,08	-62,08	115,9	-37,3	120,8	
	1	1	100	141,8	141,8	189,3	36,73	4,72	
				-53,9	-53,9	112	-29,13	129	
	80	80	80	107,4	107,4	214,8	0	0	
				-63,03	-63,03	117			
	1	1	1	116,7	116,7	233,4	0	0	
				-63,61	-63,61	116,4			

Таблица Г.16

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,II}$
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$	
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом
27	100	100	100	105,2	105,2	210,5	0	0	10
				-63,61	-63,61	116,4			
	1	100	100	212,4	121,4	200,5	15,89	6,46	
				-59,46	-59,46	114,9	-34,88	123,7	
	80	80	100	111,3	111,3	206,7	5,884	2,39	
				-62,08	-62,08	115,9	-37,49	212,1	
	1	1	100	142,3	142,3	188,8	37,24	15,15	
				-53,85	-53,85	111,9	-29,26	129,4	
	80	80	80	107,4	107,4	214,8	0	0	
				-63,03	-63,03	117			
	1	1	1	116,7	116,7	233,4	0	0	
				-60,47	-60,7	119,5			
27	100	100	100	105,2	105,2	210,5	0	0	$\infty$
				-63,61	-63,61	116,4			
	1	100	100	121,5	121,5	200,4	15,98	8,56	
				-59,46	-59,46	114	-34,96	123,9	
	80	80	100	111,3	111,3	206,6	5,91	3,2	
				-62,07	-62,07	115,9	-37,57	121,3	
	1	1	100	142,6	142,6	188,6	37,48	20,07	
				-53,82	-53,82	111,9	-29,32	129,5	
	80	80	80	107,4	107,4	214,8	0	0	
				-63,03	-63,03	117			
	1	1	1	116,7	116,7	233,4	0	0	
				-60,47	-60,7	119,5			
29	100	100	100	0	300,1	327,2	170,4	40,7	1
					-151,6	137,5	171,2	-10,96	
	1	100	100	0	300,1	327,2	170,4	40,7	
					-151,6	137,5	171,2	-10,96	
	80	80	100	0	311,2	327,3	173,4	41,41	
					-150,7	138,4	172,8	-9,35	
	1	1	100	0	362,9	326,7	187,4	44,75	
					-146,5	142,6	-179,8	-1,98	
	60	60	60	0	331	352,5	189,6	45,27	
					-151,4	141,2	173,7	-8,45	
	1	1	1	0	391,9	397,6	226	53,48	
					-150,4	148	178,6	-3,55	

Таблица Г.17

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{н.МАКС}$			Напряжения					$R_{ЗУ.П}$	
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
29	100	100	100	0	304,4	329,9	173,2	131,4	10	
					-151,9	138,1	171,5	-9,19		
	1	100	100	0	304,4	329,9	173,2	131,4		
					-151,9	138,1	171,5	-9,19		
	80	80	100	0	315,7	330	176,3	133,7		
					-151	139	173,1	-7,57		
	1	1	100	0	368,7	329,5	190,8	144,7		
					-146,7	143,3	-179,4	-0,1		
	60	60	60	0	336,4	355,8	193	146,4		
					-151,6	141,9	174,1	-6,6		
	1	1	1	0	399,7	401,9	230,7	175		
					-150,5	149	179,2	-1,5		
29	100	100	100	0	306,4	331,1	100	100	$\infty$	
					-152	138,4				
	1	100	100	0	306,4	331,1	1	100		
					-152	138,4				
	80	80	100	0	317,8	331,3	80	80		
					-151,1	139,3				
	1	1	100	0	371,5	330,8	1	1		
					-146,7	143,7				
	60	60	60	0	339	357,3	60	60		
					-151,7	142,2				
	1	1	1	0	403,5	403,9	1	1		
					-150,5	149,4				
30	ВЛ-1	100	100	100	0	264,5	270,3	131,7	41,45	1
						-143,1	132,1	173,9	-20,44	
		1	100	100	0	264,5	270,3	131,7	41,45	
						-143,1	132,1	173,9	-20,44	
		1	1	100	0	308,7	264,7	139,8	44,01	
						-138,5	135,2	-177,6	-11,91	
	ВЛ-2	100	100	100	167,5	235	210,2	37,52	31,55	1
					-14,81	-128,5	123,4	-152,9	163,8	
		100	100	100	167,5	235	210,2	37,52	31,55	
					-14,81	-128,5	123,4	-152,9	163,8	
		100	100	100	168,1	242,6	205,7	39,84	33,51	
					-15,48	-126,4	124	-144,4	172,4	

Таблица Г.18

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Напряжения					$R_{3y.II}$	
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
30	ВЛ-1	100	100	100	0	265,7	271,3	132,6	23,41	1
						-143,3	132,3	173,9	-23	
		1	100	100	0	265,7	271,3	132,6	23,41	
						-143,3	132,3	173,9	-23	
		1	1	100	0	310,3	265,7	140,9	24,88	
						-138,7	135,5	-177,5	-14,44	
	ВЛ-2	100	100	100	171,4	232,8	207,9	34,18	55,42	10
					-14,48	-127,7	122,6	-142,7	165,2	
		100	100	100	171,4	232,8	207,9	34,18	55,42	
					-14,48	-127,7	122,6	-142,7	165,2	
		100	100	100	172,1	240	203,8	36,32	58,89	
					-14,92	-125,7	123	-141,1	173,7	
30	ВЛ-1	100	100	100	0	265,8	271,4	132,8	20,94	1
						-143,3	132,3	174	-23,87	
		1	100	100	0	265,8	271,4	132,8	20,94	
						-143,3	132,3	174	-23,87	
		1	1	100	0	310,5	265,8	141,1	22,25	
						-138,7	135,5	-177,5	-15,31	
	ВЛ-2	100	100	100	171,9	232,5	207,6	33,72	58,7	30
					-14,43	-127,6	122,5	-149,2	165,3	
		100	100	100	171,9	232,5	207,6	33,72	58,7	
					-14,43	-127,6	122,5	-149,2	165,3	
		100	100	100	172,6	239,6	203,5	35,83	62,39	
					-14,84	-125,6	122,9	-140,6	173,9	
30	ВЛ-1	100	100	100	0	265,9	271,5	132,8	19,6	1
						-143,4	132,4	174	-24,46	
		1	100	100	0	265,9	271,5	132,8	19,6	
						-143,4	132,4	174	-24,46	
		1	1	100	0	310,7	265,9	141,2	20,83	
						-138,7	135,5	-177,5	-15,89	
	ВЛ-2	100	100	100	172,2	232,3	207,5	33,47	60,5	$\infty$
					-14,4	-127,6	122,4	-148,9	165,4	
		100	100	100	172,2	232,3	207,5	33,47	60,5	
					-14,4	-127,6	122,4	-148,9	165,4	
		100	100	100	172,9	239,4	203,4	35,57	64,3	
					-14,79	-125,5	122,8	-140,4	174	

Таблица Г.19

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H.МАКС}$			Напряжения					$R_{ЗУ.П}$		
				$\underline{U}_{A.N2}$	$\underline{U}_{B.N2}$	$\underline{U}_{C.N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$			
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом		
30	ВЛ-1	100	100	100	0	264,5	270,3	131,7	41,45	1	
						-143,1	132,1	173,9	-20,44		
		1	100	100	0	263,1	270,3	131	48,64		
					-143,2	131,8	173,6	-15,62			
	1	1	100	0	308,2	259,4	135,8	52,8			
					-136,2	135,1	-175,8	-20,89			
30	ВЛ-2	100	100	100	167,5	235	210,2	37,52	31,55	1	
						-14,81	-128,5	123,4	-152,9		163,8
		1	100	100	204,7	222,5	202,8	15,55	40,61		
					-9,96	-125,2	118,9	-121,9	168,5		
	1	1	100	210,5	283,5	176,1	59,39	43,01			
					-18,92	-117,1	124,6	-99,76	156,5		
30	ВЛ-1	99	100	100	0	265,6	271,3	132,6	23,43	1	
						-143,3	132,3	173,9	-22,96		
		1	100	100	0	264,7	271,5	132,3	25,43		
					-143,4	132,1	173,7	-18,34			
	1	1	100	0	309,5	261,1	137,1	28,38			
					-136,5	135,3	-175,9	-17,46			
30	ВЛ-2	99	100	100	171,7	232,7	207,9	33,97	55,65	10	
						-14,44	-127,7	122,6	-149,5		165,2
		1	100	100	210,8	219,1	200,6	12,84	71,75		
					-9,4	-124,1	117,5	-101,1	170,1		
	1	1	100	217,7	280,6	172,1	58,93	76,55			
					-18,29	-115,8	123	-92,96	158,3		
30	ВЛ-1	99	100	100	0	265,8	271,4	132,8	20,95	1	
						-143,3	132,3	174	-23,83		
		1	100	100	0	264,9	271,6	132,4	22,27		
					-143,4	132,1	173,7	-19,42			
	1	1	100	0	309,7	261,3	137,3	24,97			
					-136,6	135,4	-175,9	-1673			
30	ВЛ-2	99	100	100	172,3	232,4	207,6	33,51	55,85	30	
						-14,39	-127,6	122,4	-149		165,4
		1	100	100	211,6	218,6	200,3	12,61	76,01		
					-9,31	-124	117,3	-97,69	170,3		
	1	1	100	218,7	280,1	171,5	58,9	81,24			
					-18,2	-115,6	122,7	-92,01	158,6		

Таблица Г.20

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от P <sub>Н.МАКС</sub>			Напряжения					R <sub>ЗУ.П</sub>	
				U <sub>A,N2</sub>	U <sub>B,N2</sub>	U <sub>C,N2</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>N2,t</sub>		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
30	ВЛ-1	99	100	100	0	265,9	271,5	132,8	19,6	1
						-143,4	132,4	174	-24,43	
		1	100	100	0	265	271,7	132,5	20,53	
						-143,4	132,2	173,7	-20,18	
		1	1	100	0	309,8	261,4	137,5	23,1	
						-136,6	135,4	-175,9	-16,28	
	ВЛ-2	99	100	100	172,5	232,2	207,4	33,26	60,65	∞
					-14,36	-127,5	122,4	-148,8	165,5	
		1	100	100	212,1	218,3	200,1	12,5	78,42	
					-9,27	-123,9	117,1	-95,75	170,4	
1		1	100	219,2	279,9	171,3	58,89	83,8		
				-18,15	-115,5	122,6	-91,48	158,7		
31	ВЛ-1	100	100	100	82,36	76,86	222,5	23,07	78,56	1
					-65,57	-77,7	116,5	134,8	108,6	
		1	100	100	93,17	86,28	215,7	13,3	88,67	
					-63,31	-73,92	116	135,9	111,6	
		1	1	100	106	98,92	207,3	2,383	101,4	
					-61,8	-71,03	115,5	179,3	113,7	
		1	1	1	83,53	79,02	255,1	36,63	80,18	
					-68,95	-81,12	121,5	145,9	105,1	
	ВЛ-2	100	100	1	63,77	61,06	270,1	54,31	61,28	10
					-72,84	-88,96	121,7	138,6	99,25	
		100	1	1	72,31	69,5	263,7	47,27	69,8	
					-72,27	-86,41	121,9	142,9	100,8	
		100	100	100	188,7	178,9	213,4	8,681	87,54	
					-13,48	-129,1	116,5	161,4	109,5	
100	100	100	191,1	177,7	212,4	6,532	91,65			
			-13,43	-128,5	116,1	158,7	111,4			
100	100	100	194	176,6	211	3,949	96,94			
			-13,46	-127,6	115,7	155	113			
100	100	100	187,7	180,5	216,2	11,93	95,07			
			-13,88	-129,2	118,6	172,1	110,3			
100	100	100	183,2	182	218,7	16,03	87,18			
			-13,73	-130,6	119,2	169,1	108,1			
100	100	100	185	181,7	217,4	14,36	90,8			
			-13,91	-130	119	171,6	108,6			

Таблица Г.21

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,П}$	
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
31	ВЛ-1	100	100	100	100,3	93,67	211,2	7,082	96,4	10
					-62,76	-72,46	115,8	147	112,6	
		1	100	100	116,2	107,7	201,3	7,819	111,4	
					-59,33	-67,49	114,6	-44,06	116,7	
		1	1	100	135,9	127	189,1	26,46	130,9	
					-56,14	-62,86	112,8	-40,43	120,6	
		1	1	1	109,2	102,3	236,1	12	105,1	
					-62,41	-71,32	119,9	162,2	113,3	
		100	100	1	78,84	74,73	259	40,92	76,07	
					-69,85	-82,73	121,6	143,8	103,9	
		100	1	1	91,79	87,26	249,1	29,58	88,86	
					-67,86	-78,77	121,4	151,7	106,8	
	ВЛ-2	100	100	100	193,6	177,4	210,6	4,183	96,62	30
					-13,67	-127,6	115,9	165	112,4	
		100	100	100	197,3	175,2	209,3	1,138	102,6	
					-13,45	-126,6	115,3	125,3	115,2	
		100	100	100	201,9	172,6	207,7	3,674	110,5	
					-13,19	-125,3	114,5	11,44	118,2	
		100	100	100	194,8	177,4	212,6	5,374	106,8	
					-13,82	-127,2	117,5	177	114,5	
		100	100	100	187,5	181,1	215,8	12,19	95	
					-14,06	-129,2	118,7	174,7	110	
		100	100	100	190,5	180,1	214,1	9,475	100,4	
					-14,14	-128,3	118,3	178,8	111,4	

Таблица Г.22

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H.MAKC}$			Напряжения					$R_{3y.П}$	
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
32	ВЛ-1	100	100	100	104,1	104,1	208,2	0	0	1
					-64,84	-64,84	115,2			
		1	100	100	120	120	198,4	15,32	4,83	
					-61,06	-61,06	113,8	-38,43	127,2	
		1	1	100	140,7	140,7	186,6	35,93	11,31	
					-55,94	-55,94	111,2	-33,3	132,3	
		1	1	1	115,5	115,5	231	0	0	
	-61,73				-61,73	118,3				
	100	100	1	84,22	84,22	254	32,44	10,21		
				-71,96	-71,96	120,9	143,5	-50,8		
	100	1	1	97,8	97,8	243,8	18,83	5,93		
				-67,65	-67,65	120,1	147,8	-46,5		
	ВЛ-2	100	100	100	197	174	208,2	0	0	
					-14,06	-126,1	115,2			
100		100	100	201,7	171,6	206,3	4,366	3,67		
				-13,84	-124,8	114,3	-5,23	-48,51		
100		100	100	207,9	167,6	204,6	10,24	8,61		
				-13,28	-123	113,1	-0,11	-43,4		
100		100	100	199,4	172,6	210,3	0	0		
	-13,88			-125,5	116,4	143	157,9			
100	100	100	189,6	178	214,2	9,242	7,77			
			-14,42	-128,2	118,2	176,7	133,4			
100	100	100	193,8	176	212,2	5,366	4,51			
			-14,31	-127	117,5	-179	137,7			

Таблица Г.23

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,П}$		
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$			
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом		
32	ВЛ-1	100	100	100	104,1	104,1	208,2	0	0	1	
					-64,84	-64,84	115,2				
		1	100	100	120,4	120,4	198	15,75	2,32		
					-60,95	-60,95	113,8	-38,2	123,4		
		1	1	100	141,7	141,7	185,8	37,08	5,47		
					-55,65	-55,65	111	-32,9	128,7		
		1	1	1	115,5	115,5	231	0	0		
	-61,7				-61,7	118,3					
	100	100	1	87,57	87,57	254,9	33,35	4,92			
				-72,37	-72,37	121	143,7	-54,7			
	100	1	1	97,38	97,38	244,3	19,43	2,87			
				-67,9	-67,9	120,2	148,2	-50,2			
	ВЛ-2	100	100	100	197	174	208,2	0	0		∞
					-14,06	-126,1	115,2				
100		100	100	201,3	171,5	206,8	3,97	7,18			
				-13,77	-124,9	114,4	-1,12	-46,74			
100		100	100	206,8	167,5	205,6	9,34	16,89			
				-13,15	-123,4	113,3	4,18	-41,44			
100		100	100	199,4	172,6	210,3	0	0			
				-13,88	-125,5	116,4					
100		100	100	190,6	178	213,3	8,403	15,19			
				-14,55	-127,8	118,1	-179,2	135,2			
100	100	100	194,4	176	211,7	4,896	8,05				
			-14,38	-126,8	117,4	-174,7	139,7				

Таблица Г.24

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,П}$	
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
33	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1
					-4,84	-124,8	115,2			
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,269	0,08	
					-4,8	-124,8	115,1	17,84	-176,5	
		1	100	100	254	189,3	208,2	32,44	10,21	
					0,88	-121	108,8	23,5	-170,8	
	99	99	100	208,5	208,4	208	0,2692	0,085		
				-4,85	-124,8	115,1	-42,14	123,5		
	1	1	100	255,9	232,7	186,6	35,93	11,31		
				-4,89	-114,7	111,2	-33,3	132,3		
	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,1	208,2	0	0	
					-4,82	-124,8	115,1			
100		100	100	214,2	200,7	212	9,243	7,77		
				-1,77	-124,8	113,4	56,71	13,43		
100		100	100	208,3	208,2	208,2	0	0		
				-4,84	-124,8	115,1				
100	100	100	219	205,5	204,6	10,24	8,61			
			-3,46	121,6	113,1	-0,12	-43,4			
33	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1
					-4,84	-124,8	115,2			
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,274	0,048	
					-4,8	-124,8	115,1	17,92	-179	
		1	100	100	254,7	188,7	208,4	33,19	5,86	
					0,98	-120,9	108,6	23,7	-173,3	
	99	99	100	208,6	208,4	208	0,27	0,048		
				-4,85	-124,8	115,1	-42,1	121		
	1	1	100	256,9	232,6	185,9	36,87	6,51		
				-4,95	-114,5	111	-33	130,1		
	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,1	208,2	0	0	
					-4,82	-124,8	115,1			
100		100	100	213,4	201,5	212	8,552	13,87		
				-1,86	-125	113,6	60,06	14,9		
100		100	100	208,3	208,2	208,2	0	0		
				-4,83	-124,8	115,1				
100	100	100	218,2	205,4	205,4	9,502	15,41			
			-3,3	-121,9	113,2	3,38	-41,8			

Таблица Г.25

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3У.П}$				
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$					
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом				
33	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1			
					-4,84	-124,8	115,2						
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,2753	0,043				
					-4,8	-124,8	115,1	17,93	-179,9				
		1	100	100	254,8	188,6	208,4	33,29	5,25				
					0,99	-120,9	108,6	23,71	-174,1				
	99	99	100	208,6	208,4	208	0,2755	0,044					
				-4,85	-124,8	115,1	-42,05	120,1					
	1	1	100	257	232,6	185,9	37,01	5,84					
				-4,95	-114,5	111	-32,95	129,2					
	33	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,1	208,2	0		0	30	
						-4,82	-124,8	115,1					
100			100	100	213,3	201,6	212	8,456	14,72				
					-1,87	-125	113,7	60,55	15,1				
100			100	100	208,3	208,2	208,2	0	0				
					-4,83	-124,8	115,1						
100			100	100	218,1	205,4	205,5	9,398	16,36				
					-3,3	-121,9	113,2	3,89	-41,6				
33			ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0		1
							-4,84	-124,8	115,2				
	99	100		100	208,6	208	208,2	0,2757	0,04				
					-4,8	-124,8	115,1	17,94	179,5				
	1	100		100	254,8	188,6	208,4	33,35	4,92				
					0,99	-120,9	108,6	23,73	-174,1				
	99	99	100	208,6	208,4	208	0,2759	0,041					
				-4,85	-124,8	115,1	-42,05	120,1					
	1	1	100	257,1	232,6	185,8	37,08	5,47					
				-4,96	-114,4	111	-32,9	128,7					
	33	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,1	208,2	0	0	∞		
						-4,82	-124,8	115,1					
			100	100	100	213,3	201,6	212	8,403	15,19			
						-1,87	-125	113,7	60,83	15,2			
100			100	100	208,3	208,2	208,2	0,0695	0,126				
					-4,83	-124,8	115,1	-4,87	-50,6				
100			100	100	218,1	205,4	205,6	9,342	16,89				
					-3,3	-121,9	113,3	4,18	-41,6				

Таблица Г.26

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,II}$	
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$		
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом	
34	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1
					-4,844	-124,8	115,2			
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,3359	0,021	
					-4,77	-124,8	115,1	25,04	170,3	
		1	100	100	260,8	180,4	214,6	41,57	2,59	
					4,12	-121,2	107,1	33,93	179,2	
	99	99	100	208,6	208,4	208	0,3362	0,021		
				-4,84	-124,7	115,1	-34,92	110,31		
	1	1	100	270,1	227,1	185,1	46,71	2,92		
				-2,74	-111,1	107,8	-20,27	125		
	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	
					-4,84	-124,8	115,2			
99		100	100	208,6	208	208,2	0,3359	0,021		
				-4,77	-124,8	115,1	25,04	170,3		
1		100	100	260,8	180,4	214,6	41,57	2,59		
				-4,12	-121,2	107,1	33,93	179,2		
99	99	100	208,6	208,4	208	0,3362	0,021			
			-4,84	-124,7	115,1	-34,92	110,3			
1	1	100	270,1	227,1	185,1	46,71	2,92			
			-2,74	-111,1	107,8	-20,27	125			
34	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1
					-4,844	-124,8	115,2			
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,3342	0,033	
					-4,77	-124,8	115,1	25,15	169,9	
		1	100	100	260,6	180,6	214,6	41,34	4,05	
					4,11	-121,3	107,2	34,05	178,8	
	99	99	100	208,6	208,4	208	0,3345	0,033		
				-4,84	-124,7	115,1	-34,81	110		
	1	1	100	269,9	227	185,4	46,42	4,54		
				-2,7	-111,2	107,9	-20,14	124,5		
	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	
					-4,84	-124,8	115,2			
99		100	100	208,6	208	208,2	0,338	0,037		
				-4,77	-124,8	115,1	24,88	171,6		
1		100	100	261,2	180,2	214,5	41,87	4,65		
				-4,14	-121,2	107	33,76	-179,3		
99	99	100	208,6	208,4	208	0,3383	0,037			
			-4,84	-124,7	115,1	-35,09	111,7			
1	1	100	270,5	227,3	184,8	47,11	2,92			
			-2,79	-111	107,8	-20,27	125			

Таблица Г.27

Номер режима работы (табл. 2.1)	Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$			Напряжения					$R_{3y,II}$			
				$\underline{U}_{A,N2}$	$\underline{U}_{B,N2}$	$\underline{U}_{C,N2}$	$\underline{U}_0$	$\underline{U}_{N2,t}$				
	А	В	С	В/град	В/град	В/град	В/град	В/град	Ом			
34	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1		
					-4,844	-124,8	115,2					
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,3339	0,034			
					-4,77	-124,8	115,1	25,17	170			
		1	100	100	260,5	180,6	214,6	41,3	4,25			
					4,11	-121,3	107,2	34,06	178,8			
	99	99	100	208,6	208,4	208	0,3342	0,034				
				-4,84	-124,7	115,1	-34,8	110				
	1	1	100	269,8	227	185,4	46,38	4,77				
				-2,69	111,2	107,9	-20,13	4,77				
	34	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0		0	30
						-4,84	-124,8	115,2				
99			100	100	208,6	208	208,2	0,3383	0,0396			
					-4,77	-124,8	115,1	24,85	171,8			
1			100	100	261,2	180,1	214,5	41,91	4,94			
					-4,14	-121,2	107	33,73	-179			
99			99	100	208,6	208,4	208	0,3386	0,04			
					-4,84	-124,7	115,1	-35,11	111,9			
1			1	100	2705	227,3	184,7	47,17	5,61			
					-2,8	-111	107,7	-20,47	127			
34	ВЛ-1	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	1		
					-4,844	-124,8	115,2					
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,3339	0,035			
					-4,77	-124,8	115,1	25,19	170			
		1	100	100	260,5	180,6	214,6	41,28	4,37			
					4,11	-121,3	107,2	34,07	178,9			
		99	99	100	208,6	208,4	208	0,3341	0,035			
					-4,84	-124,7	115,2	-34,79	110,1			
		1	1	100	269,8	227	185,4	46,35	4,9			
					-2,69	111,2	107,9	-20,12	124,6			
	ВЛ-2	100	100	100	208,2	208,2	208,2	0	0	$\infty$		
					-4,84	-124,8	115,2					
		99	100	100	208,6	208	208,2	0,3385	0,041			
					-4,77	-124,8	115,1	24,85	171,9			
		1	100	100	261,3	180,1	214,5	41,94	5,1			
					4,14	-121,2	107	33,72	-178,9			
		99	99	100	208,6	208,4	208	0,3388	0,041			
					-4,84	-124,7	115,1	-35,12	112			
		1	1	100	270,6	227,3	184,7	47,2	5,79			
					-2,8	-111	107,7	-20,48	127,2			

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Протокол испытаний на физической модели системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов

Таблица Д – Протокол испытания микропроцессорного счётчика

Исходное состояние электрической сети											Новое состояние сети			
№ пп	Режим	$R_{н.а.}$ Ом	$R_{н.в.}$ Ом	$R_{н.с.}$ Ом	$U_{N2,1b}$ В	$U_0$ В	Режим	$U_{Фb}$ В	$U_{N2,1b}$ В	$U_0$ В	$t_{QF}$ сек	$t_{диск}$ сек	Комментарии	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
<b>Нормальный режим работы сети НР</b>														
	НР	700	700	700	0	0	НР				12,4		Звонок с телефона на GSM-ключ. Блок питания GSM-ключа постоянно включен.	
	НР										11,25		Срабатывание GSM-ключа и выключателя QF в начале линии четкое	
	НР										10,88			
<b>Примечания:</b>														
1. Создание любой несимметрии нагрузки не приводило к срабатыванию счётчика.														
2. Звонки с телефона на GS-ключ обуславливали четкие срабатывания ключа и отключение выключателя QF воздушной линии ВЛ-380 В. Время срабатывания выключателя QF составляло $t_{QF} = 10,88-12,4$ секунды.														
3. Примерно после 70–100 звонков со счётчика обнулился счёт на SIM-карте – первоначально было 100 рублей. На SIM-карте GSM-ключа на счету остаётся 99 рублей.														
4. Все испытания проводились при сопротивлении заземляющего устройства потребителя $R_{з.д.}$ равном бесконечности!! В этом режиме имеют место максимальные значения напряжений $U_0$ и $U_{N2,1}$ .														
<b>Обрыв фазного провода – ОФ</b>														
	НР	700	700	700	0	0	ОФВ	0	0,7	Егг	16 с	нет	Звонок диспетчеру не пришел	
	НР	700	700	700	0	0	ОФС	0	0,7	Егг	14 с	нет	Звонок не пришел	
	НР	700	700	700	0	0	ОФА	0	0,7	Егг	13 с	нет	Звонок диспетчеру пришел намного позже	
	НР	700	700	58	8,3	13	ОФА	0,4	8,3	Егг	23 с	нет	Выключатель сработал со второй попытки, звонок диспетчеру нет	
	НР	700	700	58	8	13	ОФВ	0,4	8,3	Егг	13 с	нет	Звонки диспетчеру не приходят	
	НР	700	700	58	8	13	ОФС	0,1	8,3	Егг	нет	нет		
	НР	700	700	58	8	13	ОФС	0,1	8,3	Егг	12 с	нет		
	НР	700	58	58	7,5	13	ОФА	0,5	8,4	Егг	18,5 с	нет		

Продолжение таблицы Д – Протокол испытания микропроцессорного счётчика

Новое состояние сети													
Исходное состояние электрической сети													
№ пп	Ре-жим	R <sub>НД,А</sub> , Ом	R <sub>НД,В</sub> , Ом	R <sub>НД,С</sub> , Ом	U <sub>Н2,1,В</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	Ре-жим	U <sub>Ф1</sub> , В	U <sub>Н2,1,В</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	t <sub>Ф1</sub> , сек	t <sub>дисп</sub> , сек	Комментарии
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	НР	700	58	58	7,5	13	ОФВ	0,4	8,4	Елт	нет	11 с	Отключения нет, но иногда приходят звонки диспетчеру
	НР	700	58	58	7,5	13	ОФВ	0,4	8,4	Елт	нет	нет	
	НР	700	58	58	7,5	13	ОФВ	0,4	8,4	Елт	нет	нет	
	НР	700	58	58	7,6	13	ОФС	0,4	8,6	Елт	14 с	нет	
	НР	58	58	58	0	0	ОФА	0,4	8,5	Елт	20 с	нет	
	НР	58	58	58	0	0	ОФВ	0,4	8,5	Елт	25 с	нет	
	НР	58	58	58	0	0	ОФС	0,4	8,5	Елт	25,5 с	нет	
	НР	700	700	103	7	4,4	ОФА	0,2	4,9	Елт	21 с	нет	
	НР	700	700	103	7	4,4	ОФВ	0,3	4,9	Елт	24 с	нет	
	НР	700	700	103	7	4,4	ОФС	0,1	0,86	Елт	20 с	нет	
<b>Примечания:</b>													
1. Информация на дисплее счётчика о напряжениях U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub> , U <sub>3</sub> чётко соответствует фазным напряжениям U <sub>Ф1</sub> относительно нулевого провода физической модели, которые замеряли с помощью вольтметров.													
2. Счётчик чётко реагирует на режим возникновения обрыва фазного провода. При остаточных фазных напряжениях U <sub>Ф1</sub> порядка 0,1–0,5 В счётчик показывал напряжения U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub> , U <sub>3</sub> всегда равными нулю. При этом напряжение нулевой последовательности U <sub>0</sub> счётчик показывает Елт (что говорит, что счётчик не может высчитать U <sub>0</sub> ).													
<b>Обрыв нулевого провода – ОН</b>													
	НР	700	700	103	7	4,4	ОН		86,4	87	25 с	нет	
	НР	700	58	58	7,6	13	ОН			59	15 с	нет	После восстановления нормального режима и включения выключателя иногда происходит отключение через 3-5 с
	НР	700	250	250	1,3	2	ОН		37,4	37	нет	20 с	Выключения нет, звонок диспетчеру через 20 с
	НР	700	250	250	1,3	2	ОН		37,4	37	нет	нет	
	НР	700	700	58	13	8	ОН				13,5 с	нет	

Продолжение таблицы Д – Протокол испытания микропроцессорного счётчика

Исходное состояние электрической сети										Новое состояние сети				
№ пп	Ре-жим	R <sub>н.а.</sub> , Ом	R <sub>н.в.</sub> , Ом	R <sub>н.с.</sub> , Ом	U <sub>N2.1в</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	Ре-жим	U <sub>Фн</sub> , В	U <sub>N2.1в</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	t <sub>QF</sub> , сек	t <sub>дисп.</sub> , сек	Комментарии	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	НР	700	700	250	1,3	2	ОН		49,5	50/83*	23 с	нет		
	НР	700	400	400	1	0,9	ОН		23	23	нет	нет	После выключения поступил звонок диспетчеру. Через 10 минут на телефон диспетчера пришло голосовое сообщение о том, что 10 минут назад на телефон диспетчера звонил счётчик (счётчик в этот момент был выключен).	
	НР	250	58	58	6,2	10	ОН		45,2	45	16 с	нет	Происходит отключение	
	НР	700	250	700			ОН		49,6	50		нет	Происходит отключение	
	НР	250	103	250			ОН		41	42	нет		Только звонок диспетчеру	
	НР	250	103	250	9	9	ОН		49	49		12,3	GSM-ключ не работал. Пришли звонки диспетчеру	
	НР	250	103	250	9	9	ОН		49	49		12,5	GSM-ключ не работал. Повторно пришли звонки диспетчеру	
	НР	150	58	150	5	5	ОН		43	44/77*		нет	Происходит отключение	
	НР	58	150	150	5	8	ОН		44	44	нет	17	Только звонок диспетчеру	
	НР	150	400	400	1,3	3	ОН		46,7	47	22 с	нет	Происходит отключение	

Примечания:

1. Не всегда чётко происходит отключение выключателя QF как при обрыве фазного провода, так и при обрыве нулевого провода.
2. Очень часто вместо отключения выключателя QF происходит звонок диспетчеру.
3. При несимметрии нагрузки (например R<sub>н.с</sub> = 250 Ом, R<sub>н.в</sub> = 700 Ом или при других подобных сочетаниях фазных нагрузок) и обрыве нулевого провода, когда счётчик показывает нулевое напряжение последовательности U<sub>0</sub> около 44–50 В происходят свои показания счётчика – показания возрастают до 77–83 В (в табл. эти режимы помечены \*). При смене сочетания несимметрии фазной нагрузки счётчик выдает то же самое.
4. Порог срабатывания на отключение выключателя QF примерно равен 30 В.

Продолжение таблицы Д – Протокол испытания микропроцессорного счётчика

Исходное состояние электрической сети										Новое состояние сети			
№ пп	Ре-жим	R <sub>Н.А</sub> , Ом	R <sub>Н.В</sub> , Ом	R <sub>Н.С</sub> , Ом	U <sub>N2,t</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	Ре-жим	U <sub>Фi</sub> , В	U <sub>N2,t</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	t <sub>QF</sub> , сек	t <sub>дисп</sub> , сек	Комментарии
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Одновременный обрыв фазного и нулевого проводов – ОФ+ОН</b>													
	НР	150	150	150	0	0	ОФ+ОН		67	Егг	13,5с		Поочерёдное отключение: сначала оборвали нулевой провод (появились напряжения U <sub>N2,t</sub> = 1,9 В и U <sub>0</sub> = 1,0 В.
	НР	400	80	80	4,9	8	ОФ+ОН		67,3	Егг	14 с		При одновременном обрыве фазного и нулевого проводов происходит чёткое отключение выключателя QF.
№ пп	Ре-жим	R <sub>Н.А</sub> , Ом	R <sub>Н.В</sub> , Ом	R <sub>Н.С</sub> , Ом	U <sub>N2,t</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	Ре-жим	U <sub>Фi</sub> , В	U <sub>N2,t</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	t <sub>QF</sub> , сек	t <sub>дисп</sub> , сек	Комментарии
<b>Одновременный обрыв двух фазных проводов – О2Ф</b>													
	НР	150	150	150	0	0	О2Ф		3,6	Егг	16 с		При обрыве двух фаз А и В – чёткое отключение
	НР	400	80	80	4,9	8	О2Ф		6,5	Егг	26 с		Чёткое отключение
<b>Однофазное короткое замыкание – ОКЗ</b>													
	НР	700	700	700			ОКЗ	1,3/0					Пришёл звонок диспетчеру
	НР	700	700	700			ОКЗ	0					Пришёл звонок диспетчеру
	НР	700	250	700		3	ОКЗ			Егг		14 с	Чёткое отключение
	НР	700	250	700		3	ОКЗ			Егг		13 с	Чёткое отключение
<b>Примечание:</b>													
1. Однофазное короткое замыкание создавалось в течение 2–3 с на зажимах нагрузки													
Принятые в таблице обозначения:													
R <sub>Н.А</sub> , R <sub>Н.В</sub> , R <sub>Н.С</sub> – сопротивления нагрузки; U <sub>N2,t</sub> – напряжение между нейтральным проводом на счётчике и «землёй t» физической модели; U <sub>0</sub> – напряжение нулевой последовательности, рассчитываемое и показываемое счётчиком; U <sub>Фi</sub> – напряжение между фазным нулевым проводом на входе счётчика; t <sub>QF</sub> , t <sub>дисп</sub> – соответственно время срабатывания выключателя QF в начале линии и время дозвона до диспетчера.													

Окончание таблицы Д – Протокол испытания микропроцессорного счётчика

**Общие выводы:**

1. В целом счётчик правильно определяет режимы работы сети.
2. GSM-ключ, блок управления выключателем и автоматический выключатель правильно реагируют на сторонние звонки на номер SIM-карты GSM-ключа.
3. Есть вопросы по вычислению напряжения нулевой последовательности  $U_0$  счётчиком при определённых значениях несимметрии нагрузки – при напряжении  $U_0 = 44-50$  В. Что-то неладно с расчётной формулой.
4. Не чётко работает инициализация звонков. Здесь, видимо, во-первых, нужно убрать предупреждающие звонки (они могут оказаться излишними для дежурного диспетчера – давайте пока их уберём), во-вторых, сначала нужно организовать последовательно звонки диспетчеру о возникновении аварийной ситуации, а потом отключающий звонок на GSM-ключ.
5. Нужно готовить опять два счётчика – один для полигона ( $U_L = 380$  В) и один для физической модели ( $U_L = 220$  В). На полигоне возможности по отработке защиты всё же ограничены, а на физической модели можно создавать различные ситуации практически любые и неограниченное количество раз.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты исследований режимов работы электрической сети  
в опытной электрической сети

Таблица Е.1 – Исследование режимов работы опытной электрической сети на-  
пряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = 6,37 \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
1. Нормальный режим работы								
1.1. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
1	13:25	217,778	217,231	218,609	376,512	377,203	378,370	0,255
2	13:26	218,254	217,732	219,027	377,254	378,026	379,221	0,188
1.2. $R_{H.A} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
3	13:33	236,178	208,341	217,806	386,057	376,347	384,134	13,478
4	13:34	235,927	208,383	217,710	385,895	376,199	383,931	13,327
5	13:35	236,124	208,586	218,007	386,156	376,662	384,416	13,319
1.3. $R_{H.A} = R5 = 20 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
6	13:39	248,300	202,946	218,596	393,131	376,585	388,723	22,090
7	13:40	247,779	203,063	218,400	392,778	376,399	388,254	21,815
8	13:41	248,054	203,430	218,726	393,292	377,028	388,786	21,797
1.4. $R_{H.A} = R8 = 96 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
9	13:44	257,109	199,665	219,399	398,669	377,457	392,107	28,193
10	13:45	256,811	199,686	219,359	398,374	377,351	392,002	28,012
11	13:46	256,577	199,412	219,092	397,909	376,837	391,665	27,980
1.5. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
12	13:49	259,000	198,136	219,053	399,156	376,588	392,169	29,848
13	13:50	258,916	198,053	218,952	398,948	376,395	392,137	29,801
14	13:51	258,662	197,674	218,555	398,344	375,738	391,617	29,835
1.6. $R_{H.A} = R_{H.C} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
15	13:56	227,961	207,306	236,654	386,082	382,883	394,123	14,332
16	13:57	228,227	208,204	236,774	386,851	383,719	394,789	13,909
17	13:58	228,355	208,406	236,692	387,197	383,765	394,815	13,853
1.7. $R_{H.A} = R_{H.C} = R4 = 20 \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
18	14:04	230,500	204,940	243,050	389,669	385,253	398,855	19,037
19	14:05	230,278	204,868	242,774	389,363	384,963	398,475	18,942
20	14:06	230,778	205,370	243,491	390,141	386,030	399,638	18,935
21	14:07	230,618	205,363	243,369	389,990	385,943	399,372	18,907

Таблица Е.2 – Исследование режимов работы опытной электрической сети на-  
пряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = 6,37 \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
1.8. $R_{H.A} = R_{H.C} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
22	14:10	238,771	197,225	262,955	399,256	393,149	413,614	33,518
23	14:11	238,553	197,296	262,740	399,051	392,959	413,431	33,348
24	14:12	238,330	197,254	262,639	398,764	392,806	413,264	33,275
25	14:13	238,264	197,222	262,607	398,672	392,714	413,234	33,256
2. Разрыв фазы С в рубильнике после ВЛ-380 В								
2.1. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
26	14:22	199,025	219,080	0,171	377,936	218,981	199,197	59,953
27	14:23	198,990	218,970	0,171	377,732	218,870	199,162	59,979
28	14:24	198,676	218,521	0,171	377,037	218,421	198,848	59,871
29	14:25	198,498	218,227	0,171	376,643	218,124	198,670	59,779
2.2. $R_{H.A} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
30	14:29	222,360	205,243	0,311	389,795	205,062	222,670	58,812
31	14:30	222,493	205,614	0,313	390,059	205,431	222,806	59,018
32	14:31	222,608	205,788	0,313	390,312	205,602	222,921	59,064
33	14:32	222,561	205,829	0,312	390,265	205,640	222,874	59,092
2.3. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
34	14:36	237,860	196,609	0,400	397,743	196,415	238,251	59,770
35	14:37	238,251	197,016	0,402	398,449	196,822	238,643	59,890
36	14:38	238,342	197,010	0,398	398,570	196,816	238,729	59,878
37	14:39	237,567	196,538	0,394	397,407	196,347	237,954	59,709
3. Обрыв нулевого провода в рубильнике после ВЛ-380 В								
3.1. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
38	14:49	322,672	191,433	189,537	404,920	375,886	396,104	86,861
39	14:50	322,504	192,104	189,792	405,486	376,653	396,517	86,459
40	14:51	322,021	192,114	189,834	405,130	376,635	396,386	86,158
41	14:52	321,273	191,716	189,494	404,386	375,853	395,613	85,844
3.2. $R_{H.A} = R8 = 96 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
42	14:56	314,532	192,894	191,001	402,889	376,674	394,795	80,126
43	14:57	314,026	193,007	190,989	402,628	376,670	394,644	79,775
44	14:58	314,334	193,252	191,105	403,083	376,981	395,141	79,779
45	14:59	314,257	193,306	191,179	403,108	377,089	395,128	79,717
3.3. $R_{H.A} = R7 = 51,2 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
46	15:11	308,375	192,579	191,419	400,149	375,181	392,753	75,511
47	15:12	308,016	193,180	191,627	400,467	375,751	393,120	74,993
48	15:13	307,958	193,425	191,759	400,645	376,045	393,347	74,836
49	15:14	308,004	193,588	191,790	400,811	376,201	393,513	74,784

Таблица Е.3 – Исследование режимов работы опытной электрической сети напряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = 6,37 \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
3.4. $R_{H.A} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
50	15:18	274,390	198,511	198,474	390,459	374,658	386,049	47,682
51	15:19	274,197	199,383	199,267	391,197	375,811	386,939	47,067
52	15:20	273,932	199,501	199,379	391,169	375,956	386,809	46,888
53	15:21	274,584	200,004	200,031	392,195	377,011	387,859	46,946
54	15:22	274,597	200,258	200,159	392,525	377,385	387,806	46,922
3.5. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
55	15:25	217,602	218,062	218,666	377,385	377,554	378,375	0,645
56	15:26	217,582	217,811	218,334	376,960	377,168	378,139	0,484
57	15:27	217,879	218,039	218,535	377,311	377,686	378,531	0,385
58	15:28	218,172	218,142	218,523	377,634	377,778	378,780	0,319
3.6. $R_{H.A} = R_{H.B} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
59	15:35	250,434	242,827	183,717	392,691	386,708	386,205	38,581
60	15:36	250,193	242,609	184,040	392,519	386,645	386,287	38,287
61	15:37	250,091	242,516	184,089	392,350	386,573	386,277	38,234
62	15:38	250,227	242,637	184,384	392,527	386,989	386,617	38,204
3.7. $R_{H.A} = R_{H.B} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
63	15:43	264,112	260,767	166,709	399,077	392,746	390,749	58,153
64	15:44	263,857	260,231	166,926	398,662	392,378	390,651	57,841
65	15:45	263,664	259,858	166,842	398,282	391,910	390,418	57,728
66	15:46	263,702	259,794	166,984	398,281	391,985	390,548	57,669
3.8. $R_{H.A} = R_{H.B} = R7 = 51 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
67	15:52	302,703	305,427	120,303	409,186	402,477	400,138	109,856
68	15:53	302,028	305,063	120,858	409,067	402,600	399,798	109,240
69	15:54	301,946	304,894	121,223	409,165	402,727	399,978	108,974
70	15:55	301,787	304,599	121,484	409,019	402,662	400,005	108,726
3.9. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
71	15:59	321,659	324,512	100,405	412,254	406,284	404,693	132,394
72	16:00	321,059	323,973	100,920	412,311	406,166	404,413	131,712
73	16:01	320,452	323,378	101,190	411,925	405,803	403,975	131,208
74	16:02	320,231	323,018	101,499	411,868	405,692	403,980	130,868
3.10. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$								
75	16:08	329,983	330,000	0,000	348,174	363,068	332,764	201,073
76	16:09	329,980	330,000	0,000	347,320	364,150	329,963	200,646
77	16:10	329,980	330,000	0,000	347,100	364,123	329,962	200,679
78	16:11	329,980	330,000	0,000	347,154	364,080	329,961	200,651

Таблица Е.4 – Исследование режимов работы опытной электрической сети напряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						$U_0$
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	
1. Нормальный режим работы								
1.1. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
1	10:10	218,976	219,222	220,151	379,717	380,316	380,239	0,498
2	10:11	219,535	219,874	220,541	380,725	381,202	381,116	0,421
3	10:12	219,204	219,502	220,160	380,073	380,554	380,539	0,389
1.2. $R_{H.A} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
4	10:18	238,307	210,233	219,766	390,042	379,862	386,908	13,832
5	10:19	238,167	210,592	220,013	390,115	380,310	387,217	13,593
6	10:20	238,002	210,478	219,817	389,896	379,980	386,954	13,542
1.3. $R_{H.A} = R5 = 20 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
7	10:24	243,965	207,364	219,778	392,832	379,843	388,416	18,232
8	10:25	243,837	207,612	219,869	392,904	380,107	388,453	18,091
9	10:26	243,841	207,661	219,891	393,015	380,089	388,505	18,038
1.4. $R_{H.A} = R8 = 96 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
10	10:30	259,154	199,890	219,922	400,730	378,728	393,338	29,254
11	10:31	259,040	200,328	220,059	400,949	379,125	393,582	28,992
12	10:32	259,102	200,483	220,160	401,104	379,366	393,731	28,972
1.5. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
13	10:35	261,292	198,735	219,715	401,796	378,276	393,712	30,870
14	10:36	261,055	198,940	219,616	401,651	378,269	393,717	30,625
15	10:37	260,721	198,945	219,464	401,210	378,146	393,473	30,483
1.6. $R_{H.A} = R_{H.C} = R3 = 9 \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
16	10:49	237,599	225,887	210,838	393,485	387,717	385,963	13,612
17	10:50	237,531	225,879	210,676	393,485	387,522	385,758	13,598
18	10:51	237,426	225,855	210,624	393,393	387,473	385,588	13,583
1.7. $R_{H.A} = R_{H.C} = R4 = 12 \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
19	10:59	244,508	230,280	206,524	399,137	391,303	388,038	19,413
20	11:00	244,291	230,134	206,741	398,918	391,288	388,039	19,229
21	11:01	244,156	230,006	206,762	398,729	391,161	387,942	19,160
1.8. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
22	11:05	263,044	238,961	196,867	411,946	399,307	394,240	34,286
23	11:06	262,448	238,472	196,808	411,225	398,684	393,672	34,005
24	11:07	262,646	238,658	196,765	411,662	398,757	393,798	34,024

Таблица Е.5 – Исследование режимов работы опытной электрической сети на-  
пряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика,  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						$U_0$
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	
<b>2. Разрыв фазы С в рубильнике после ВЛ-380 В</b>								
<b>2.1. <math>R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом};</math></b>								
25	11:17	198,748	219,044	0,193	378,267	218,943	198,940	59,477
26	11:18	198,682	219,063	0,176	378,106	218,959	198,859	59,564
27	11:19	198,434	218,715	0,171	377,491	218,615	198,606	59,531
<b>2.2. <math>R_{H.A} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
28	11:24	222,929	205,123	0,314	390,514	204,934	223,243	58,668
29	11:25	222,913	205,450	0,312	390,737	205,255	223,225	58,749
30	11:26	222,755	205,360	0,312	390,531	205,161	223,068	58,697
<b>2.3. <math>R_{H.A} = R_{H.C} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
31	11:29	239,067	196,320	0,400	398,948	196,110	239,462	59,742
32	11:30	239,072	196,479	0,399	398,986	196,266	239,466	59,833
33	11:31	239,174	196,557	0,399	399,147	196,345	239,568	59,861
<b>3. Обрыв нулевого провода в рубильнике после ВЛ-380 В – <math>R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}</math></b>								
<b>3.1. <math>R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
34	11:38	329,981	188,154	187,375	384,541	375,530	374,599	110,035
35	11:39	329,980	188,607	187,934	384,782	376,542	374,858	110,036
36	11:40	329,980	189,412	188,876	385,164	378,289	375,325	110,042
37	11:41	329,980	189,427	189,001	385,081	378,428	375,459	110,050
<b>3.2. <math>R_{H.A} = R8 = 96 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
38	11:43	329,701	188,758	188,603	392,741	377,011	383,904	105,035
39	11:44	329,980	189,487	189,123	391,887	378,251	383,104	104,483
40	11:45	329,980	189,549	189,170	391,983	378,358	383,096	104,468
41	11:46	329,980	189,589	189,218	391,955	378,445	383,185	104,463
<b>3.3. <math>R_{H.A} = R7 = 51,2 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
42	11:49	329,980	189,503	189,378	397,388	377,663	389,448	99,867
43	11:50	329,980	189,908	189,675	397,670	378,354	389,646	99,810
44	11:51	329,980	190,108	189,876	397,741	378,751	389,822	99,789
<b>3.4. <math>R_{H.A} = R4 = 20 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
45	11:58	312,203	191,514	192,938	399,089	377,652	393,038	80,085
46	11:59	312,355	191,807	193,107	399,590	378,041	393,367	79,992
47	12:00	312,223	191,749	193,078	399,451	377,932	393,316	79,912
<b>3.5. <math>R_{H.A} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}</math></b>								
48	13:05	291,703	194,496	195,958	393,646	376,690	389,068	63,000
49	13:06	290,643	194,366	195,730	392,888	376,158	388,228	62,450
50	13:07	290,582	194,631	196,007	393,020	376,637	388,484	62,329

Таблица Е.6 – Исследование режимов работы опытной электрической сети напряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
3.6. $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
51	13:11	217,385	217,500	218,358	376,411	377,047	377,976	0,429
52	13:12	217,556	217,567	218,171	376,502	377,056	377,965	0,314
53	13:13	217,556	217,594	218,018	376,499	377,021	377,782	0,283
3.8. $R_{H.A} = R_{H.B} = R4 = 13 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
57	13:47	282,930	277,420	142,844	400,401	393,909	393,075	83,166
58	13:48	282,879	277,328	143,193	400,588	394,095	393,238	82,920
59	13:49	282,369	276,799	143,076	399,846	393,526	392,598	82,719
3.9. $R_{H.A} = R_{H.B} = 51 \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
60	13:55	329,980	330,000	53,952	384,450	391,858	375,938	167,664
61	13:56	329,980	330,000	53,963	384,645	391,904	375,937	167,632
62	13:57	329,980	330,000	53,879	384,202	391,463	375,880	167,608
3.10. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
63	14:00	329,983	330,000	0,000	348,784	362,394	334,444	201,305
64	14:01	329,980	330,000	0,000	347,446	364,367	329,960	200,710
65	14:02	329,980	330,000	0,000	347,418	364,317	329,960	200,696

Таблица Е.7 – Исследование режимов работы опытной электрической сети напряжением 380 В. Замеры на зажимах счётчика,  $R_{3У.П} = \text{vario}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
4. Исследование изменения параметров ВЛ 380 В в нормальном режиме при $R_{3У.П} = \text{vario}$								
4.1. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = 6,37 \text{ Ом}$								
66	14:21	326,127	328,949	93,501	410,892	405,104	404,135	138,902
67	14:22	325,445	328,370	94,520	411,213	405,358	404,182	137,936
68	14:23	325,061	327,898	95,282	411,531	405,488	404,358	137,228
4.2. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = 6,37 \text{ Ом}$								
69	14:28	325,875	191,344	190,320	407,025	376,885	398,494	88,547
70	14:29	325,492	191,699	190,412	407,022	377,230	398,588	88,190
71	14:30	324,957	191,604	190,150	406,591	376,828	398,105	87,929
4.3. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = 15,8 \text{ Ом}$								
72	14:53	329,980	189,316	187,663	399,588	375,335	390,381	98,251
73	14:54	329,980	189,658	187,771	399,940	375,711	390,921	97,982
74	14:55	329,980	189,943	187,951	400,293	376,125	391,242	97,801
4.4. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = 15,8 \text{ Ом}$								
75	14:59	329,980	330,000	66,145	393,962	396,337	387,336	159,835
76	15:00	329,980	330,000	67,382	395,113	397,093	388,314	159,038
77	15:01	329,980	330,000	68,292	395,603	397,433	389,042	158,437
4.5. $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$								
78	15:04	329,980	330,000	52,534	384,304	391,438	376,224	169,228
79	15:05	329,980	330,000	53,329	384,796	391,609	376,864	168,640
80	15:06	329,980	330,000	53,450	384,863	391,277	376,949	168,406
4.6. $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}; R_{3У.П} = 30 \text{ Ом}$								
81	15:09	329,980	188,538	187,223	396,979	374,584	387,831	100,071
82	15:10	329,980	188,891	187,297	397,121	374,996	388,070	100,002
83	15:11	329,980	189,366	187,594	397,399	375,761	388,269	99,960

Таблица Е.8 – Выборочные измерения комплектом «Ресурс» во время испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
<b>1 Нормальный режим работы электрической сети</b>								
1.1 Симметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
2	09:53	215,894	215,678	216,781	373,812	374,101	375,057	0,413
1.2 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = \infty; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
6	10:00	259,927	197,586	217,859	399,511	375,413	391,445	30,577
7	10:01	259,688	197,758	217,829	399,379	375,425	391,460	30,347
1.3 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
9	10:04	262,014	237,620	195,801	410,403	396,591	392,818	33,884
10	10:05	261,827	237,525	196,090	410,319	396,673	392,880	33,663
<b>2 Обрыв провода фазы С в конце воздушной линии</b> (переход от нормального режима к режиму работы с обрывом провода фазы С)								
2.1 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = \infty; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
13	10:15	259,551	197,087	217,733	398,808	374,832	390,987	30,595
14	10:16	259,381	197,087	217,537	398,698	374,634	390,665	30,538
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								
2.2 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
20	10:25	215,242	215,502	216,229	373,120	373,388	374,073	0,508
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								
2.3 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
24	10:35	215,991	216,146	216,746	374,165	374,771	374,952	0,237
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								

**Примечание к таблицам Е8–Е11.** Измерительный комплекс «Ресурс», имея минутный интервал обработки данных, при некоторых режимах либо не смог совсем обработать информацию при возникновении аварийного режима, либо обработал искажённо, т.к. отключение воздушной линии происходило где-то в середине интервала измерения. В тоже время при нормальном режиме, предшествующем аварийному режиму, фиксация данных производилась полностью.

Таблица Е.9 – Выборочные измерения комплектом «Ресурс» во время испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
2.4 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
38	11:05	216,295	216,364	216,919	374,685	374,985	375,421	0,267
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								
2.5 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
42	11:13	216,472	216,760	217,222	375,263	375,438	375,904	0,406
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								
2.6 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
44	11:19	217,041	217,253	218,224	376,069	376,883	377,230	0,411
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								
<b>3 Обрыв нулевого провода в конце воздушной линии</b> (переход от нормального режима к режиму работы с обрывом нулевого провода)								
3.1 Симметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = R1 = 4,5 \text{ Ом}$								
47	11:24	217,032	217,279	218,309	376,029	377,053	377,279	0,395
48	11:25	217,041	217,253	218,224	376,069	376,883	377,230	0,411
49	11:26	217,203	217,387	217,645	375,945	376,671	377,075	0,295
3.2 Нагрузка несимметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = 9 \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом};$								
52	11:48	236,506	224,455	209,288	391,435	384,914	383,796	13,617
53	11:49	249,041	240,477	185,643	391,516	385,397	384,708	38,196
54	11:50	245,350	237,358	178,584	382,794	376,866	376,320	39,462
3.3 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = 12 \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
55	11:55	242,821	204,580	217,406	389,542	375,172	385,518	18,595
56	11:56	278,375	197,594	198,015	391,371	375,228	386,800	51,260
3.4 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом};$								
59	12:01	260,355	197,153	218,276	399,792	375,391	391,842	30,901
60	12:02	260,300	197,226	218,213	399,778	375,325	391,889	30,795
61	12:03	303,655	192,937	200,797	402,473	375,268	393,894	75,480

Таблица Е.10 – Выборочные измерения комплектом «Ресурс» во время испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Вре- мя	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
3.5 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом};$								
64	12:09	262,631	238,069	195,677	410,839	397,274	393,127	34,408
65	12:10	262,834	238,374	196,644	411,517	398,186	394,195	34,036
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв провода фазы С								
3.6 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом};$								
68	12:17	263,081	238,278	196,029	411,683	397,593	393,829	34,284
69	12:18	263,016	238,530	196,564	411,944	398,288	394,135	34,087
70	12:19	313,020	307,574	124,059	407,181	401,056	397,777	128,351
3.7 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом};$								
72	12:25	263,139	238,245	195,488	411,275	397,281	393,523	34,661
73	12:26	323,218	321,058	65,149	355,510	368,109	339,098	188,755
4 Одновременный обрыв провода фазы С и нулевого провода N в конце линии (переход от нормального режима к обрыву фазного и нулевого проводов)								
4.1 Несимметричная нагрузка $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
75	13:27	259,905	196,578	217,549	398,615	374,273	391,164	30,860
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв фазного и нулевого проводов								
4.2 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
78	13:33	216,718	216,412	217,622	375,044	375,380	376,698	0,414
79	13:34	208,301	207,586	176,232	375,946	323,769	325,069	9,336
80	13:35	157,863	156,570	0,194	311,903	156,591	157,892	13,216
5 Однофазное короткое замыкание в конце линии (переход от нормального режима к однофазному короткому замыканию)								
5.1 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
82	13:52	216,791	216,503	217,391	375,144	375,408	376,454	0,265
83	13:53	193,722	192,151	79,471	374,973	222,491	224,054	14,866
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать однофазное короткое замыкание								
5.2 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
85	13:56	216,400	216,161	217,369	374,655	375,136	375,910	0,407
86	13:57	238,369	237,993	179,686	374,171	348,344	349,001	77,525
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать однофазное короткое замыкание								

Таблица Е.11 – Выборочные измерения комплектом «Ресурс» во время испытания системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов. Замеры на зажимах счётчика.  $R_{3У.П} = \infty \text{ Ом}$

№ пп	Время	Напряжение, В						
		$U_{A.N2}$	$U_{B.N2}$	$U_{C.N2}$	$U_{AB2}$	$U_{BC2}$	$U_{CA2}$	$U_0$
6 Обрыв фазы С в трансформаторной подстанции (переход от нормального режима к режиму работы с обрывом фазного провода)								
6.1 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
89	14:49	216,105	216,086	216,881	374,215	374,727	375,276	0,281
90	14:50	203,622	216,488	125,899	374,234	280,042	270,635	48,094
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв фазного провода до конца								
6.2 Нагрузка несимметричная $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
92	14:55	259,396	196,785	217,209	398,237	374,202	390,491	30,659
93	14:56	248,415	195,834	151,095	397,215	295,530	321,042	47,704
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв фазного провода до конца								
6.3 Нагрузка несимметричная $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$ (включаем воздушную линию и счётчик сразу с оборванной фазой)								
94	15:00	196,884	160,365	0,342	327,522	160,226	197,208	48,994
95	15:01	238,498	195,198	0,413	397,292	195,029	238,893	59,630
6.4 Нагрузка несимметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
98	15:06	259,889	237,326	186,198	409,653	384,803	380,854	40,364
99	15:07	236,216	235,672	0,000	408,474	235,670	236,207	78,761
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв фазного провода до конца								
7 Обрыв нулевого провода в начале линии (переход от нормального режима к режиму работы с обрывом нулевого провода)								
7.1 Нагрузка несимметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = \infty \text{ Ом}; R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
101	15:27	264,056	240,258	192,799	409,775	396,530	392,907	39,904
102	15:28	302,854	304,478	120,741	410,230	402,406	399,742	109,031
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв нулевого провода до конца								
7.2 Нагрузка несимметричная $R_{H.A} = \infty \text{ Ом}; R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
105	15:34	277,601	194,487	209,787	399,685	374,240	392,626	50,317
106	15:35	251,636	155,094	155,132	325,747	302,722	319,530	61,162
ИК «Ресурс» не успел зафиксировать обрыв нулевого провода до конца								
7.3 Нагрузка симметричная $R_{H.A} = R_{H.B} = R_{H.C} = 4,5 \text{ Ом}$								
108	15:39	216,394	216,356	217,957	374,735	375,630	376,681	0,603
109	15:40	216,637	216,507	218,078	375,000	375,896	377,041	0,534

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.1

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ЗАО

«Электротехнические заводы

«Энергомера»

В.А. Курсикова  
2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор филиала

ОАО «МРСК Урала» –

«Челябэнерго»

И.В. Бутаков  
2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ»

(НИУ)

С.Д. Давыдов  
2014 г.

## АКТ ИСПЫТАНИЯ

СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ  
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В  
НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

г. Челябинск

«06» августа 2014 г.

В лаборатории кафедры «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) на физической модели сети проведено испытание системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.

Система защиты содержит микропроцессорный счётчик электрической энергии изготовления ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», который дополнен функциями, позволяющими выявлять обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В. Указанные дополнения стали возможны в результате аналитических и экспериментальных исследований, выполненных аспирантом кафедры «Безопасность жизнедеятельности» А.В. Млотоком.

Испытания проведены в несколько этапов:

25–27.02.2014 г. – пуско-наладочные работы системы защиты, показавшие принципиальную возможность работы.

Март – апрель 2014 г. – расширенные испытания системы защиты при различных режимах работы электрической сети (обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии, однофазные короткие замыкания и др.) при широком диапазоне несимметрии фазных нагрузок потребителей. Эти испытания позволили выявить ряд недостатков системы защиты, например, последовательность срабатывания защиты и оповещения оперативного персонала о возникновении в электрической сети аварийной ситуации.

Июль – август 2014 г. – расширенные испытания системы защиты после доработки микропроцессорного счётчика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведённые испытания на физической модели показали принципиальную возможность использования микропроцессорного счётчика электрической энергии, дополненного определёнными функциями, в качестве системы защиты от

обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.

2. Для решения вопроса о внедрении разработанной системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов необходимо продолжить испытания в опытной электрической сети напряжением 380 В.

Главный инженер Корпоративного института  
электротехнического приборостроения



Филатов О.В.

Главный инженер филиала ОАО «МРСК  
Урала» – «Челябэнерго»



Млоток А.В.

Доцент кафедры «Системы электроснабжения»  
ЮУрГУ, к.т.н., доцент



Ершов А.М.

Заведующий кафедрой «Безопасность жизне-  
деятельности» ЮУрГУ, д.т.н., профессор



Сидоров А.И.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.2

УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера»  В.А. Курсикова 2014 г. 	УТВЕРЖДАЮ Директор филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»  И.В. Бутаков «06» августа 2014 г. 	УТВЕРЖДАЮ Проректор по научной работе ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)  С.Д. Баудин «06» августа 2014 г. 
--	--	---

**АКТ ИСПЫТАНИЯ  
СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОБРЫВОВ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ  
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В  
В ОПЫТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

г. Челябинск

«06» августа 2014 г.

В опытной электрической сети напряжением 380 В, расположенной на полигоне «Челябэнерго», проведено испытание системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В.

Система защиты содержит микропроцессорный счётчик электрической энергии изготовления ЗАО «Электротехнические заводы «Энергомера», который дополнен функциями, позволяющими выявлять обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети напряжением 380 В. Указанные дополнения стали возможны в результате аналитических и экспериментальных исследований, выполненных аспирантом кафедры «Безопасность жизнедеятельности» А.В. Млотоком.

Испытания проведены в опытной электрической сети напряжением 380 В, которая состоит из комплектной трансформаторной подстанции с силовым трансформатором ТМГ-160 напряжением 10/0,4 кВ, мощностью 160 кВА и воздушной линии напряжением 380 В, выполненной неизолированными проводами и имеющей длину 481 м. В конце линии подключена ячейка нагрузочных сопротивлений, которая позволяет изменять несимметрию фазных нагрузок более чем в 20-ти кратном диапазоне, а также получать полное отсутствие нагрузки на одной или двух фазах.

В опытной электрической сети создавались различные режимы работы воздушной линии:

1. Нормальный режим при изменении фазных нагрузок.
2. Аварийные режимы:
  - 2.1. Поочерёдные обрывы одного из фазных проводов при изменении фазных нагрузок.
  - 2.2. Одновременные обрывы двух фазных проводов.
  - 2.3. Обрыв нулевого провода при изменении фазных нагрузок.
  - 2.4. Одновременный обрыв нулевого и одного из фазных проводов.

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

Проведённые испытания показали:

1. При нормальном режиме работы электрической сети и широком изменении несимметрии фазных нагрузок срабатывания системы защиты не происходит.

2. При возникновении любого из указанных выше аварийных режимов работы электрической сети система защиты выявляет их и выполняет последовательно два действия:

2.1. Формирует по GSM-каналу звонок оперативному персоналу электрической или диспетчеру электрической сети о возникновении аварийной ситуации – время звонка составляет 12–15 сек.

2.2. Формирует по GSM-каналу звонок на GSM-ключ, установленный в трансформаторной подстанции, от которой питается воздушная линия. GSM-ключ, получив звонок, через блок управления подаёт напряжение на независимый распределитель автоматического выключателя, который отключает воздушную линию с возникшим повреждением. Время отключения автоматического выключателя составляет 25–30 сек. после момента возникновения того или иного обрыва провода на линии.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведённые испытания в опытной электрической сети подтвердили работоспособность разработанной системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов электрической сети напряжением 380 В, построенной на основе микропроцессорного счётчика электрической энергии, дополненного определёнными функциями.

2. Полученные результаты испытаний позволяют говорить о целесообразности организации выпуска опытной партии системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов для продолжения массовых проверок в реальных электрических сетях.

Главный инженер Корпоративного института электротехнического приборостроения

Филатов О.В.

Главный инженер филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго»

Млоток А.В.

Доцент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ, к.т.н., доцент

Ершов А.М.

Заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» ЮУрГУ, д.т.н., профессор

Сидоров А.И.