

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет «Механико-технологический»
Кафедра «Безопасности жизнедеятельности»

Рецензент, _____

_____ / _____ /

« ____ » _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой БЖД

_____ / А.И. Сидоров /
« ____ » _____ 2017 г.

Система мониторинга состояния воздушных линий 6, 10 кВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ
ЮУрГУ – 20.04.01.2017.375 ПЗ МД

Научный руководитель, профессор

_____ / А.И. Сидоров /

« ____ » _____ 2017 г.

Автор диссертации

студент группы П–268

_____ / С.А. Тропин /

« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролер, доцент

_____ / А.В. Кудряшов /

« ____ » _____ 2017 г.

Челябинск 2017

РЕФЕРАТ

Тропин С.А. – Челябинск:
ЮУрГУ, П–268, 2017. – 61 с.,
20 ил., 12 табл., библиогр. список –
51 наим.

Данная магистерская диссертация посвящена разработке системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ. В ходе работы были проанализированы характерные особенности и опасности электрических сетей напряжением 6, 10 кВ, выполненных воздушными линиями, существующие способы и средства защиты воздушных линий от обрывов фазных проводов. Также определена возможность применения информации о режимных параметрах электрической сети для построения системы мониторинга состояния воздушных линий.

Разработанная система позволит в любой момент времени определить, в каком режиме работает электрическая сеть, и, при возникновении аварийной ситуации, оперативно принять меры к ее устранению. Предложения и расчеты, выполненные в работе, могут быть использованы при дальнейших исследованиях в области повышения надежности и электробезопасности распределительных электрических сетей.

SYNOPSIS

Tropin S.A – Chelyabinsk: SUSU,
P–268, 2017. – 61 p, 20 il, 12tabl,
Bibliografy – 51.

This master`s thesis is devoted to development of the monitoring system of a condition of 6, 10 kV overhead lines. The characteristics and dangers of 6, 10 kV electric networks were analysed , and the existing methods and means of protection of overhead lines from wires breakage were studied during the work. The application of information on regime parameters of an electrical network for creation of monitoring system of a condition of overhead lines was also defined.

This system makes it possible to define at any time in what mode the electrical network works, and also to quickly eliminate an emergency. The offers and calculations executed in the work can be used in subsequent researches in the field of electrical safety of distributive electric networks.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Общая характеристика воздушных линий напряжением 6, 10 кВ.....	10
1.2 Опасности, возникающие при обрыве фазных проводов воздушной линии напряжением 6, 10 кВ	13
1.3 Способы и средства защиты при обрывах фазных проводов воздушной линии напряжением 6, 10 кВ	15
1.4 Задачи исследования.....	18
2 АНАЛИЗ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6, 10 КВ ...	19
2.1 Режимные параметры	19
2.2 Применение режимных параметров для контроля состояния воздушных линий 6, 10 кВ.....	23
2.3 Выводы.....	26
3 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СЕТЯХ 6, 10 КВ	27
3.1 Компьютерная модель	27
3.2 Результаты исследований на компьютерной модели.....	36
3.3 Апробация и проверка адекватности компьютерной модели на опытной электрической сети	43
3.4 Выводы.....	46
4 ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6, 10 КВ.....	48
4.1 Повышение надежности распределительных сетей путем секционирования воздушной линии напряжением 380 В	48
4.2 Описание системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ	51
4.3 Выводы.....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	56
ПРИЛОЖЕНИЕ А	60

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы:

В соответствии со статьей 20 Конституции Российской Федерации каждый человек имеет право на жизнь [1]. Зачастую опасность для жизни человека могут представлять различные промышленные объекты. К одним из таких объектов являются электроустановки различных классов напряжений, в частности, воздушные линии электропередачи.

В общем балансе электрических сетей воздушные линии электропередач составляют значительную долю. В нашей стране эксплуатируется около двух миллионов километров воздушных линий электропередачи. Наиболее распространенные из них – это электрические сети напряжением 6 – 35 кВ, которые также называют распределительными сетями [9]. Свыше 50% этих сетей отслужили более 30 лет [33].

В связи с высоким износом надежность этих электрических сетей в последние годы снижаются. По данным ПАО «Россети» в среднем за год происходит до 100 отключений на 100 км [33].

Одним из наиболее частых повреждений воздушной линии электропередачи напряжением 6, 10 кВ является обрыв фазного провода. Подобный обрыв создает повышенную опасность для людей и животных. Электропоражение может произойти в случае прикосновения к оборванному проводу или при попадании в зону шагового напряжения.

В настоящее время обнаружение места обрыва провода эксплуатационным персоналом занимает достаточно продолжительное время, что увеличивает вероятность причинения вреда здоровью людей. Также продолжительное время устранения аварийного режима сети может привести к тяжелым экономическим и социальным потерям.

В связи с этим, разработка метода определения наличия и места обрыва фазного провода воздушной линии электропередачи напряжением 6, 10 кВ является в настоящее время актуальной научно-технической задачей.

Для решения проблемы оперативного определения наличия и места обрыва провода в данной работе предлагается построить систему мониторинга состояния воздушной линии напряжением 6, 10 кВ, использующую информацию о режимных параметрах электрической сети.

Цель работы: разработать систему мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ с изолированной нейтралью, основанную на измерении величин режимных параметров.

Реализация цели требует постановки и решения следующих основных задач исследования:

- провести анализ состояния вопроса и обосновать задачи исследования;
- провести анализ режимных параметров в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ;
- разработать компьютерную модель воздушной линии напряжением 6, 10 кВ в программном комплексе «Matlab»;
- исследовать взаимосвязь между величинами режимных параметров и состоянием сети;
- разработать систему мониторинга состояния воздушных линий 6, 10 кВ.

Объект исследования: воздушная линия электропередачи напряжением 6, 10 кВ.

Предмет исследования: взаимосвязь между режимом работы воздушной линии и величинами режимных параметров.

Научная новизна: состоит в обосновании возможности применения режимных параметров для определения наличия и места обрыва фазного провода воздушной линии 6, 10 кВ; определена зависимость между местом обрыва и величиной симметричных составляющих напряжения; разработана принципиальная схема системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ.

Апробация результатов исследования: результаты работы представлены на четырех международных и региональных конференциях, аспирантских семинарах

кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета (НИУ).

Публикации: по материалам диссертации опубликовано четыре статьи, получен патент на изобретение.

Структура магистерской диссертации: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка.

Объем работы: содержит 61 страниц машинописного текста, 12 таблиц, 20 рисунков. Библиографический список включает 51 источник.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования поставленных задач исследования необходимо, в первую очередь, проанализировать характерные особенности распределительных сетей для того, чтобы выявить наиболее «слабые» элементы воздушных линий и определить опасности, возникающие при повреждении этих элементов.

1.1 Общая характеристика воздушных линий напряжением 6, 10 кВ

Согласно 7-му изданию Правил устройства электроустановок (ПУЭ) воздушной линией называют устройство, предназначенное для передачи электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным к опорам, несущим конструкциям, стойкам и кронштейнам на инженерных сооружениях (мостах, путепроводах и т. п.) при помощи изолирующих конструкций и арматуры [35].

Общая протяженность воздушных линий электропередачи в настоящее время в нашей стране составляет порядка 1882333 км, причем практически половину из них составляют распределительные сети напряжением от 6 до 35 кВ [33].

Таблица 1.1 – Протяженность линий электропередачи различных классов напряжения

Класс напряжения, кВ	Суммарная протяженность линии электропередачи, км	Воздушные линии, км
220	9719	371070
110-150	225238	
35	155286	
6, 10	936534	845069,122
0,38	712355	666194,06
Общая протяженность	2033132	188233,172

Распределительные электрические сети характеризуются большой протяженностью при относительно небольшой передаваемой мощности [5]. Это обуславливает высокую стоимость распределительных сетей по сравнению с прочими электрическими сетями. К распределительным сетям относят электрические сети напряжением от 0,4 до 35 кВ, а в ряде случаев и 110 кВ [50, 51]. Наибольшее распространение среди них получили воздушные линии электропередачи напряжением 6 и 10 кВ.

Характерной особенностью сетей напряжением 6, 10 кВ является то, что от одной линии, как правило, питаются несколько самостоятельных потребителей, что осуществляется при помощи отпайек на основной магистрали [5, 6, 42]. В таком случае потребители могут быть удалены друг от друга на достаточно большие расстояния. Следует отметить, что средняя длина воздушной линии напряжением 6, 10 кВ, как правило, не превышает 15 – 20 км [37].

Распределительные электрические сети по своему схемному решению могут быть разделены на радиальные; радиальные с секционированием; секционированные с сетевым резервированием и петлевые [3, 49].

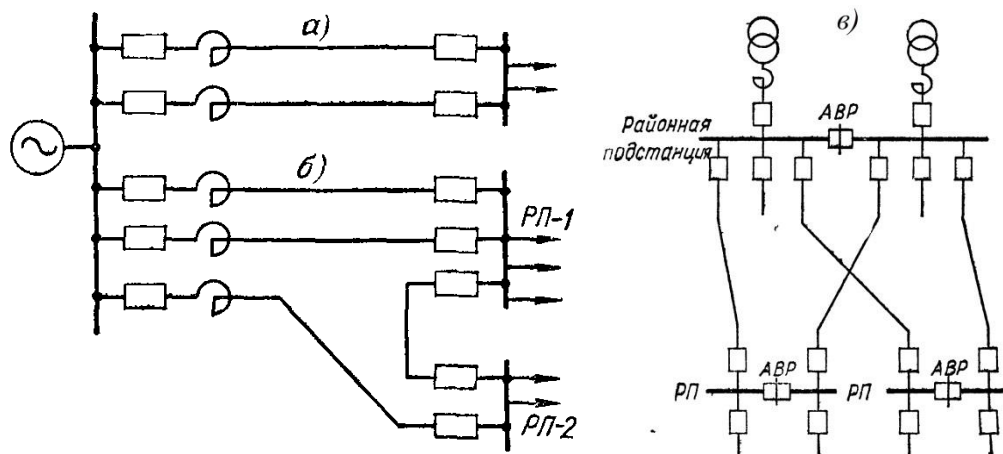


Рисунок 1.1 – Схемы электрических сетей: а) радиальная; б) петлевая; в) радиальная с секционированием; РП – распределительный пункт; АВР – автоматический ввод резерва

В электрических сетях напряжением 6, 10 кВ можно выделить типовые схемы, приведенные на рисунке 1.1. Однако подобные схемы в том виде, в котором они

показаны на рисунке, встречаются крайне редко. Реальные схемы распределительных сетей гораздо сложнее и представляют собой комбинации типовых схем с большим числом ответвлений от воздушных линий. Сложность структуры электрических сетей обуславливается их историческим развитием, а также строительством в настоящее время большого числа новых промышленных, сельскохозяйственных и социальных объектов, что не всегда согласовывается с требованиями технико-экономической целесообразности.

Электрические сети напряжением 6, 10 кВ, образованные воздушными линиями, эксплуатируются с изолированной нейтралью и характеризуются токами однофазного замыкания на землю, как правило, до 5 – 10 А [15, 48]. Этот факт обуславливает сложность подбора устройств релейной защиты электрической сети. Так же следует отметить, что в настоящее время около 65% воздушных линий напряжением 6, 10 кВ выполнены на железобетонных опорах.

Эксплуатируемым распределительным электрическим сетям свойственна относительно высокая степень несимметрии (до 5%) [11]. Перечисленные особенности во многом влияют на надежность распределительных электрических сетей.

Основными элементами распределительной электрической сети являются линии электропередачи 6...35 кВ, подстанции 35/6, 10 кВ, трансформаторные пункты 6, 10/0,4 кВ. Надежность отдельных этих элементов определяет надежность распределительной сети в целом. Повреждаемость элементов распределительных сетей распределяется следующим образом:

ВЛ 35 кВ	– 3,6%
подстанции 35/6,10 кВ	– 4,6%
ВЛ 6,10 кВ	– 87,4%
ТП 10/0,4 кВ	– 4,4% [34]

Как видно из предоставленной статистики, воздушные линии электропередачи являются «слабым звеном» распределительных сетей, на которое приходится значительно большее число повреждений, по сравнению с прочими элементами

распределительных сетей. По данным ПАО «Россети» в настоящее время происходит в среднем 10 повреждений на каждые 100 км воздушных линий напряжением 6, 10 кВ. Вызвано это во многом из-за того, что более чем 50% из них отслужили 30 лет и более [33].

Модернизация распределительных электрических сетей, призванная решить проблему высокого износа, идет медленными темпами. Связано это, в первую очередь, с огромной протяженностью электрических сетей.

1.2 Опасности, возникающие при обрыве фазных проводов воздушной линии напряжением 6, 10 кВ

Как уже говорилось в предыдущем параграфе повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6, 10 кВ происходят достаточно часто. Одним из наиболее частых видов повреждений таких воздушной линии является обрыв фазного провода. Подобный обрыв зачастую может приводить к возникновению опасных для людей и животных ситуаций. По информации, представленной на Международной Конференции по безопасности и охране труда в энергетике SAPE в 2014 году 84% всех случаев электротравматизма приходится на электрические сети, причем 56% из них – смертельные. Отмечено также, что большая часть электротравм происходит именно в электрических сетях напряжением 6,10 кВ (рисунок 1.2) [30].

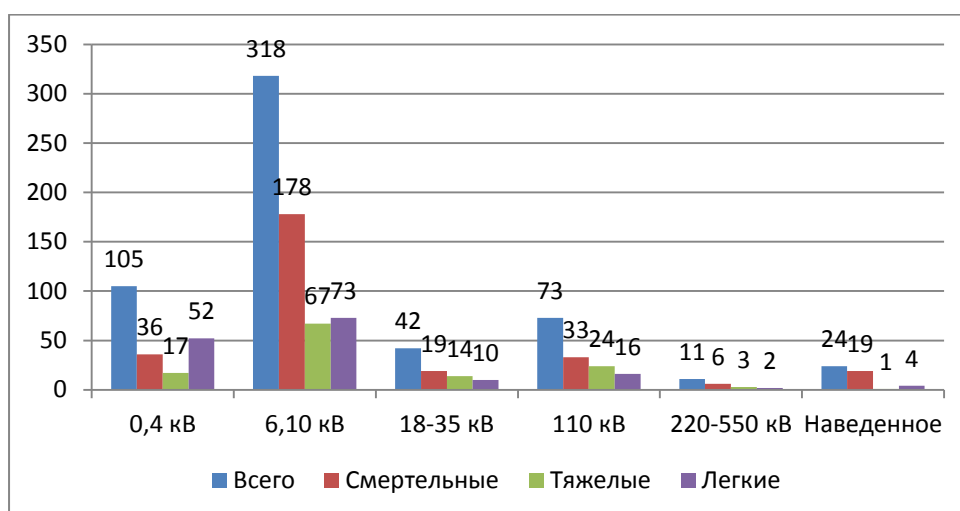


Рисунок 1.2 – Распределение травм по классам напряжений

Электротравмы в электрических сетях происходят чаще всего из-за непосредственного прикосновения к проводу, который оборвался или провис. Нередко имеет место ситуация, когда оборванный провод остается на земле под напряжением в течение нескольких суток из-за несовершенства средств защитного отключения линии. Рассмотрим вопрос, чем же опасен провод, упавший на землю.

При обрыве и падении фазного провода, находящегося под напряжением, на землю или проводящую поверхность (металлические сооружения, заборы и т.д.) происходит растекание токов замыкания. На открытом пространстве токи растекаются на достаточно большое расстояние. Опасным считается поле растекания тока в радиусе восьми метров от точки касания проводом земли. Если человек находится в поле растекания токов, то он может попасть под так называемое шаговое напряжение.

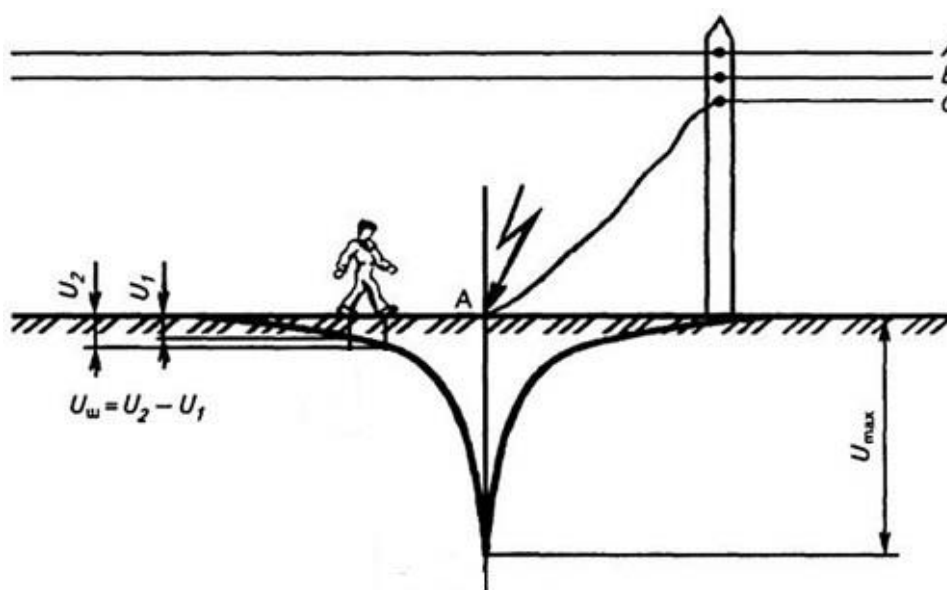


Рисунок 1.3 – Схема образования шагового напряжения.

U_1 – потенциал левой ноги; U_2 – потенциал правой ноги; $U_{ш}$ – шаговое напряжение; A – точка касания проводом земли

Шаговым напряжением называется напряжение, которое возникает между двумя точками поверхности, в нашем случае между левой и правой ногами человека, то есть на расстоянии шага, принимаемого 1 м [40]. Электротравма

возникает из-за разности потенциалов в месте касания земли левой и правой ногами (рисунок 1.3).

Так же следует отметить, что оборванные провода воздушных линий электропередачи могут привести к возникновению пожароопасных ситуаций. Спровоцировать пожар может образование дуги и искр вследствие прикосновения оборванного провода к металлической конструкции. Учитывая, что большинство воздушных линий напряжением 6, 10 кВ расположены в сельской местности, можно отметить, что возникновение подобного рода пожаров нередко приводит к тяжелым экономическим и социальным потерям.

1.3 Способы и средства защиты при обрывах фазных проводов воздушной линии напряжением 6, 10 кВ

В настоящее время разработано большое количество способов и средств определения места повреждения воздушной линии электропередачи напряжением 6, 10 кВ. Все методы определения места повреждения можно подразделить на дистанционные и топографические методы.

Дистанционные методы подразумевают применение различных технических устройств, установленных на подстанциях и определяющих расстояние до места повреждения. Топографические методы же предполагают определение места повреждения воздушной линии непосредственно при движении вдоль линии электропередачи, при этом технические средства находятся в распоряжении эксплуатационного персонала.

При эксплуатации воздушных линий электропередачи наибольшее распространение получили петлевой и локационные методы определения места повреждения [47].

Петлевой метод основан на измерении сопротивления до места замыкания. Данный метод обладает следующим недостатком: дает результат только при металлических замыканиях, в то время как большинство замыканий на землю носят иной характер.

Локационные методы основываются на измерении времени между моментом посылки в линию зондирующего сигнала и моментом его возвращения к началу линии. Недостатком данного метода является то, что при определении места повреждения могут возникнуть затруднения в получении отраженного сигнала достаточной амплитуды. Также сложность создает разветвленность распределительной сети [4].

Для определения места повреждения воздушной линии применяются различные технические устройства, которые можно разделить на две группы:

а) фиксирующие приборы для определения расстояния до места повреждения, автоматически измеряющие и фиксирующие необходимые электрические величины во время аварийного режима;

б) приборы, предназначенные для определения поврежденных участков линии (указатели коротких замыканий, сетевые датчики) [24].

В настоящее время разработано большое количество фиксирующих приборов. Наибольшее распространение в распределительных сетях получили приборы типа ФИП (фиксирующие импульсные приборы), ЛИФП (линейный импульсный фиксирующий прибор) и др. Принцип работы этих приборов основан на фиксировании значения тока короткого замыкания. Используя эту величину и величину напряжения сети определяется сопротивление линии до точки короткого замыкания. Зная эту величину можно определить и расстояние до места замыкания.

Данные приборы имеют ряд недостатков. Так, для определения расстояния до места короткого замыкания необходимы дополнительные расчеты или построение эквитоковых кривых, на точность прибора влияет ряд величин (переходное сопротивление в месте повреждения, значение тока нагрузки) [2].

Также для определения места повреждения линии используются фиксирующие омметры. При измерении реактивного сопротивления уменьшается влияние сопротивления дуги в точке повреждения линии, что, в свою очередь,

повышает точность прибора. К таким приборам относятся фиксирующие омметры типа ФМК-10, ФИС и т. д. [21].

Устройства для определения поврежденных участков воздушной линии, как правило устанавливаются в местах разветвлений воздушной линии. Эти приборы фиксируют появление токов короткого замыкания на ответвлении линии за точкой установки устройства. Наибольшее распространение получили указатели поврежденных участков типа УПУ и указатели короткого замыкания типа УКЗ. Данные указатели фиксируют возникновение короткого замыкания при помощи индукционного датчика, устанавливаемого в зоне проводов, но не имеющего связи с ними.

Установка указателей поврежденных участков дает возможность эксплуатационному персоналу при повреждении линии объехать точки разветвления воздушной линии и определить поврежденный участок. Недостатком данных приборов является тот факт, что прибор не определяет точного расстояния до места короткого замыкания, что ведет к большим затратам времени на отыскание этого места.

Также стоит отметить устройства для определения места однофазного замыкания на землю. К ним относятся переносные приборы, принцип действия которых основан на измерении высших гармонических составляющих тока замыкания на землю [24].

В распределительных сетях получили распространение приборы типа «Волна» и «Зонд». Прибор «Зонд» имеет важное преимущество по сравнению с «Волной» так как он обеспечивает не только определение места замыкания на землю, но и направление поиска. Недостатком приборов является то, что для обнаружения места замыкания на землю необходим обход поврежденной линии, что влечет затраты времени и сил эксплуатационного персонала.

В настоящее время все большую популярность приобретают устройства защиты воздушной линии при аварийных режимах, в которых применяются микропроцессорные счетчики. В числе таких приборов микропроцессорные

устройства TOP-120, TOP-110 ИЗН (осуществляют защиту линии, регистрируют аварийные режимы), индикаторы короткого замыкания серии ИКЗ (позволяют оперативно-выездной бригаде различить тип короткого замыкания и направление поиска места аварии) [28, 29].

Таким образом, можно сказать, что общими для всех существующих способов определения места повреждения воздушной линии электропередачи недостатками являются низкая точность определения расстояния, большие затраты времени на поиск повреждения и необходимость использования дорогостоящего оборудования [39]. В то же время, обширный функционал микропроцессорных приборов защиты воздушной линии делает возможной разработку нового способа определения места повреждения воздушной линии, лишенного указанных недостатков [43].

1.4 Задачи исследования

Изучение особенностей распределительных электрических сетей, анализ опасностей, вызванных обрывами фазных проводов, а также обзор существующих средств и методов поиска места обрыва, показали, что повышение уровня электробезопасности воздушных линий электропередачи напряжением 6, 10 кВ может быть достигнуто путем создания системы мониторинга состояния воздушной линии, позволяющей оперативно обнаружить обрыв фазного провода. Для решения данной задачи необходимо выполнить следующие исследования:

- 1) Провести анализ режимных параметров в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ;
- 2) Разработать компьютерную модель воздушной линии напряжением 6, 10 кВ в программном комплексе «Matlab»;
- 3) Исследовать взаимосвязь между величинами режимных параметров и состоянием сети;
- 4) Разработать систему мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ

2 АНАЛИЗ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6, 10 КВ

Одним из общих недостатков известных в настоящее время способов и средств определения места обрыва фазного провода является необходимость применения дополнительного оборудования. Для того, чтобы избежать этого недостатка в ходе работы было решено разработать систему мониторинга состояния воздушной линии 6, 10 кВ на основе информации о режимных параметрах сети, которую можно получить благодаря использованию микропроцессорных счетчиков электрической энергии, которые уже встроены в электрическую сеть. Таким образом можно существенно снизить экономические затраты на обеспечение надежной работы воздушных линий.

2.1 Режимные параметры

При анализе работы сети определяют параметры элементов сети и режимные параметры.

К параметрам элементов электрической сети относятся сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации. Параметрам сети являются также электродвижущая сила (э.д.с.) источников и задающие токи (мощности) нагрузок.

К режимным параметрам относятся: величины токов в ветвях, напряжений в узлах, значения частоты, фазовых углов, полной, активной и реактивной мощностей электропередачи, а также значения, характеризующие несимметрию трехфазной системы напряжений или токов и несинусоидальность изменения напряжения и токов в течение периода основной частоты (появления напряжений и токов обратной и нулевой последовательности).

Ветвью называется участок цепи, состоящий из одного или нескольких элементов, вдоль которого ток один и тот же (рисунки 2.1, 2.2) [23].

Узлом называют место соединения трех и более ветвей [23].

Состояние электрической сети в некотором интервале времени называют режимом работы сети. Режим работы определяется режимными параметрами.

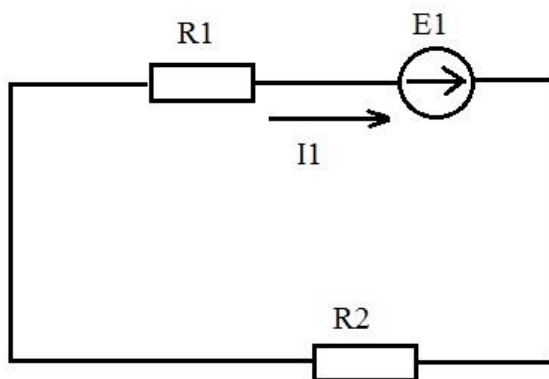


Рисунок 2.1 – Ветвь электрической цепи

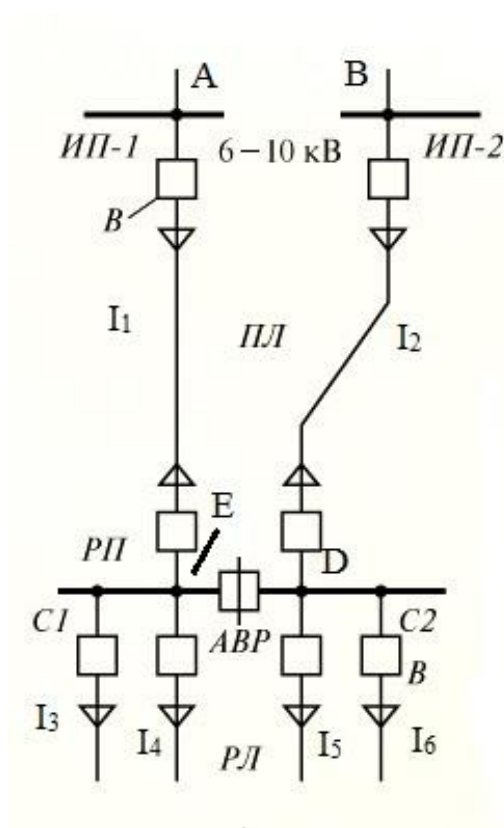


Рисунок 2.2 – Схема электрической сети напряжением 6, 10 кВ. Буквами А, В, С, D обозначены узлы. I_{1-6} – ветви электрической сети

Рассмотрим возможные режимы работы электрических систем. При работе в нормальном установившемся режиме значения основных величин, таких как частоты и напряжения равны номинальным или находятся в пределах допустимых отклонений от них. Нагрузка в сети изменяется медленно, благодаря чему можно плавно регулировать работу сетей и электростанций, а основные параметры

удерживаются в пределах допустимых норм. Следует отметить, что нормальным считается также режим, возникающий при включении и отключении мощных линий или трансформаторов, а также при резкопеременных (ударных) нагрузках. В таких случаях после завершения переходного процесса, продолжающегося доли секунды, вновь наступает установившийся нормальный режим, когда значения параметров в контрольных точках системы оказываются в допустимых пределах.

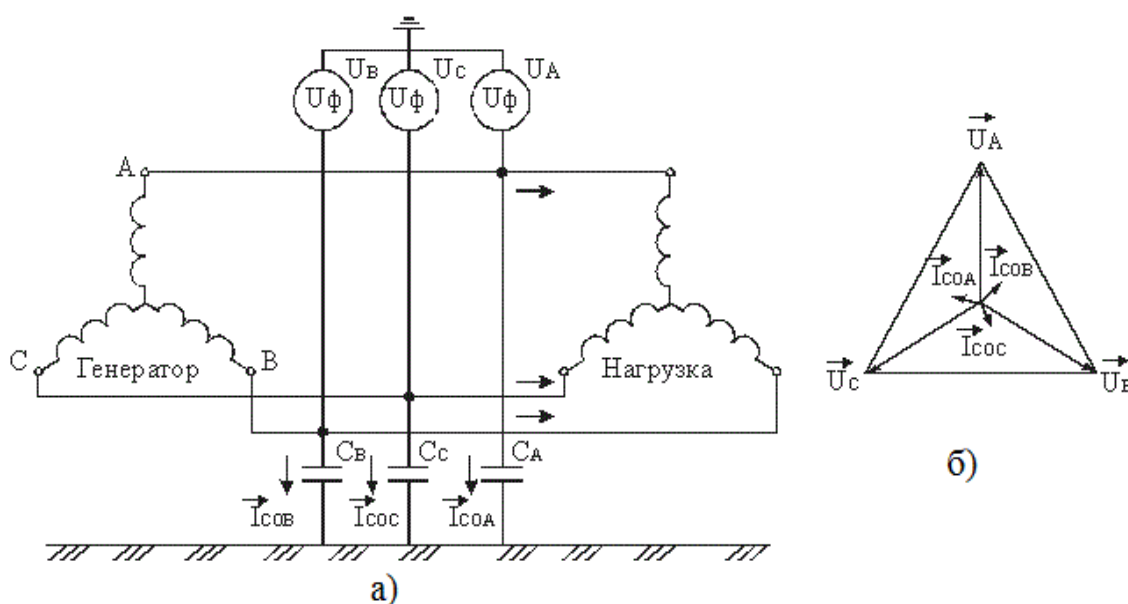


Рисунок 2.3 – а) Электрическая сеть с изолированной нейтралью в нормальном режиме б) диаграмма напряжений при нормальном режиме работы сети

В нормальном режиме работы напряжения фаз сети относительно земли симметричны и равны фазному напряжению, а емкостные токи фаз относительно земли также симметричны и равны между собой (рисунок 2.3, а).

Геометрическая сумма емкостных токов трех фаз равна нулю. Емкостный ток нормального режима в одной фазе в современных сетях с изолированной нейтралью, как правило, не превышает нескольких ампер.

При неустановившемся переходном режиме система переходит из нормального установившегося состояния в другое установившееся с резко изменившимися параметрами. Такой режим наступает при внезапных изменениях в схеме, резких изменениях генераторных и потребляемых мощностей и считается аварийным. В частности, такой режим имеет место при авариях на сетях или

станциях, например при отключении поврежденных элементов сети вследствие коротких замыканий. Во время аварийного переходного режима параметры режима системы в некоторых ее контрольных точках сильно отклоняются от номинальных значений [27].

Послеаварийный установившийся режим наступает после локализации аварии в системе. Такой режим чаще всего отличается от нормального, так как в результате аварии один или несколько элементов системы (генератор, трансформатор, линия) будут выведены из работы. При послеаварийных режимах нередко возникает так называемый дефицит мощности, когда мощность генераторов в рабочей части электрической системы меньше, чем мощность потребителей. Параметры послеаварийного режима могут в той или иной степени отличаться от допустимых норм. Так, если значения этих параметров во всех контрольных точках системы являются допустимыми, то исход аварии можно считать благополучным. В противном случае исход аварии неблагоприятен и диспетчерская служба системы должна принять немедленные меры к тому, чтобы устранить последствия аварии и привести режимные параметры в соответствие с допустимыми.

Номинальные значения режимных параметров определенной сети могут быть получены расчетным путем, применяя основные законы электротехники (закон Ома, законы Кирхгофа) [25].

Так как в данной работе аварийный режим сети напряжением 6, 10 кВ будет обусловлен в первую очередь обрывом фазного провода, то для определения этого режима целесообразно использовать метод симметричных составляющих.

Метод симметричных составляющих относится к специальным методам расчета трехфазных цепей и широко применяется для анализа несимметричных режимов их работы, в том числе с нестатической нагрузкой [13]. В основе метода лежит представление несимметричной трехфазной системы переменных (ЭДС, токов, напряжений и т.п.) в виде суммы трех симметричных систем, которые называют симметричными составляющими. Различают симметричные

составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые различаются порядком чередования фаз [7].

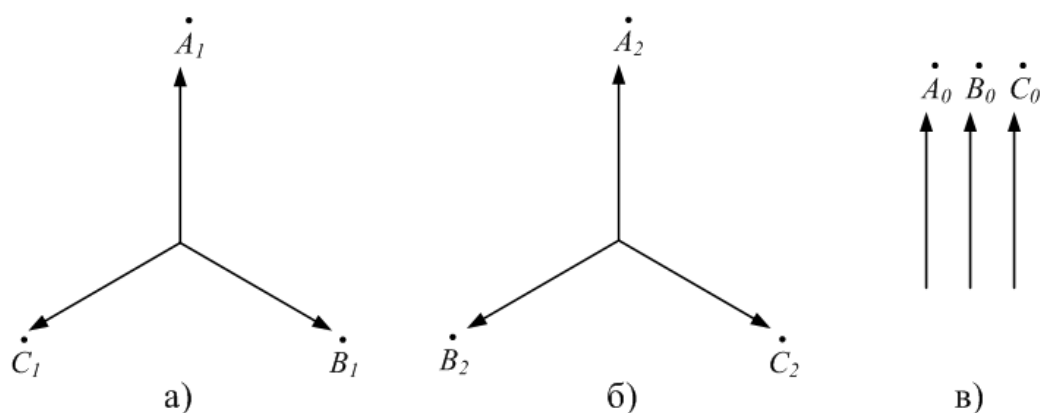


Рисунок 2.4 – Векторные диаграммы системы симметричных составляющих: а – прямой последовательности; б – обратной последовательности; в – нулевой последовательности

Составляющие обратной последовательности возникают при появлении в сети любой несимметрии: однофазного или двухфазного короткого замыкания, обрыва фазы, несимметрии нагрузки.

Составляющие нулевой последовательности имеют место при замыканиях на землю (одно- и двухфазных) или при обрыве одной или двух фаз. В случае междуфазного замыкания составляющие нулевой последовательности (токи и напряжения) равны нулю [36].

2.2 Применение режимных параметров для контроля состояния воздушных линий 6, 10 кВ

Вопросами применения режимных параметров электрической сети для контроля ее состояния продолжительное время занимается кафедра «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета. Основным направлением работы в данном случае является применение режимных параметров для непрерывного контроля изоляции электрической сети напряжением 6, 10 кВ с изолированной нейтралью.

Начало исследования возможности использования режимных параметров для контроля изоляции было положено в статье А.А. Сельницына, А.И. Сидорова и Н.А. Бендяка [38].

Впоследствии эта тема была развита в докторской диссертации А.И. Сидорова [41]. В этой работе было выведено следующее уравнение, позволяющее на основании измерений режимных параметров сети в конце линии осуществить контроль и измерение уровня изоляции электрической сети относительно земли:

$$Y = \frac{R_e \cdot U_{1\phi} + j \cdot I_m \cdot U_{1\phi} - U_{2\phi} \cdot (R_e \cdot I_2 - j \cdot I_m \cdot I_2)(R + j \cdot x)}{(R/2 + j \cdot x/2)(U_{2\phi} + (R_e \cdot I_2 - j \cdot I_m \cdot I_2)(R/2 + j \cdot x/2))}, \quad (2.1)$$

где Y – полная проводимость фазы линии относительно земли;

R_e – действительная часть активного продольного сопротивления фазы линии;

$U_{1\phi}$ – фазное напряжение в начале линии;

I_m – мнимая часть величины тока;

$U_{2\phi}$ – фазное напряжение в конце линии;

I_2 – ток в конце линии;

R – активная составляющая полного продольного сопротивления фазы линии;

x – реактивная составляющая полного продольного сопротивления фазы линии.

Данное уравнение позволяет определить уровень изоляции при известных значениях активной и реактивной составляющих полного сопротивления фазы линии так как в ходе расчета становится известна полная проводимость фазы линии относительно земли.

Дальнейшее развитие данный способ применения режимных параметров получил в работе Н.А. Хусаиновой [45]. В данной работе автором были предложены 6 групп уравнений, позволяющих определить параметры изоляции относительно земли на основании значений режимных параметров. Также

автором был предложен метод определения места локального снижения уровня изоляции сети в результате пробоя изолятора, падения фазного провода ВЛ на землю, повреждения изоляции и т.д.

Метод определения места локального снижения уровня изоляции основывается на том факте, что при нормальном состоянии изоляции сети проводимости всех трех фаз примерно одинаковы. При этом резкое повышение проводимости изоляции какой-либо из фаз относительно других, как правило, связано с повреждением изоляции. Таким образом, если определить проводимости изоляции всех фаз, применяя информацию о режимных параметрах, то в ходе преобразований можно вычислить значение коэффициента $k_1 = l_1/l$, где l_1 – длина участка линии от начала до места снижения, l – длина всей линии. Зная коэффициент k_1 не представляет труда определить место локального повреждения изоляции.

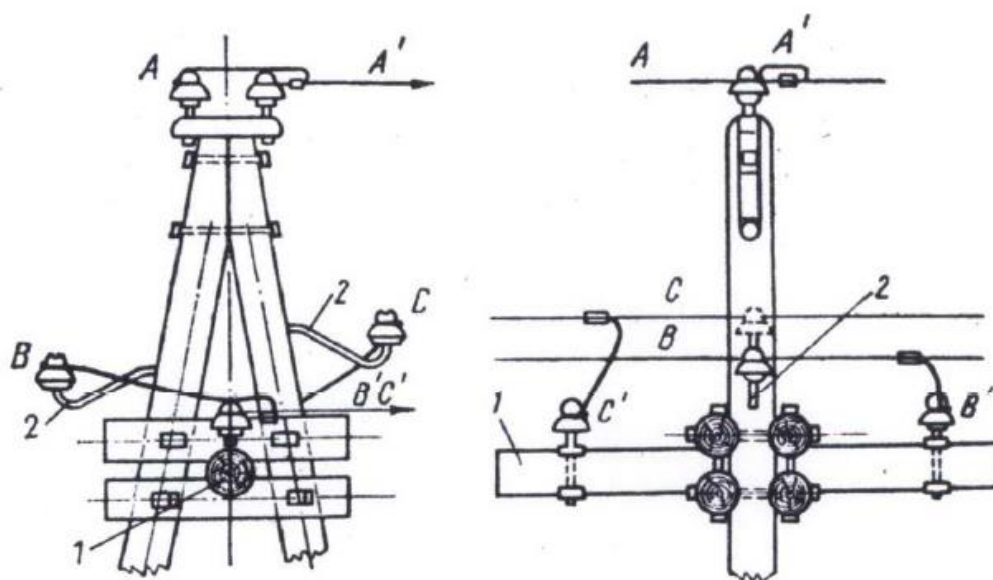


Рисунок 2.5 – Верхушка отпаечной опоры ВЛ 6, 10 кВ:

А, В, С и А', В', С' – провода магистральной линии и отпайки; 1 – траверса;
2 – дополнительный крюк

Стоит отметить, что у данного метода есть существенный недостаток. Определение места локального снижения уровня изоляции возможно только для сети, не имеющей отпаяк. Большинство распределительных сетей в нашей стране имеет отпайки. Отпайки применяются для сокращения длины воздушной линии.

При этом воздушная линия присоединяется не к трансформаторной подстанции, а непосредственно к магистральной линии. Отпайка ВЛ 6, 10 кВ выполняется, как правило, через разъединитель, установленный на дополнительной опоре (рисунок 2.5) [12].

Проблема определения уровня изоляции воздушной линии напряжением 6, 10 кВ с отпайками на основе информации о режимных параметрах сети была решена Ю.В. Косоротовой [20]. В ее работе был усовершенствован метод, разработанный Н.А. Хусаиновой. Для определения уровня изоляции линии с отпайкой необходимо знать не только значение режимных параметров в начале и конце линии, но и в конце отпайки. Сама линия делится на главную и отпаечную. Далее автор предлагает, используя вычисленные аналитические зависимости определять проводимость главной и отпаечной линии, на основании чего можно сделать вывод о состоянии изоляции электрической сети.

2.3 Выводы

1) Выполненный во 2 главе данной работы анализ режимных параметров в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ позволяет утверждать о возможности определения состояния указанных линий на основании измерения этих параметров.

2) Применение для определения состояния воздушной линии электропередачи с изолированной нейтралью (снижение уровня сопротивления изоляции, появление однофазного замыкания, обрывы фазных проводов) режимных параметров дает возможность построения системы мониторинга электрической сети практически без установки дополнительного оборудования.

3 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СЕТЯХ 6, 10 КВ

Для разработки системы мониторинга состояния электрической сети необходимо определить величины режимных параметров при нормальном и аварийных режимах работы. Реализация такого аварийного режима как обрыв фазного провода создает опасные ситуации для электрооборудования, людей и животных и не может быть исследована в действующей электрической сети. Опасностей можно избежать благодаря современному развитию компьютерных технологий, которые позволяют активно использовать различные программные продукты для достаточно точного моделирования электрических сетей. Подобные компьютерные модели позволяют изучать различные состояния сетей, благодаря чему появляется возможность разработки систем мониторинга.

3.1 Компьютерная модель

С целью проведения исследований зависимости между состоянием сети и величинами режимных параметров на кафедре «Безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета была создана компьютерная модель электрической сети напряжением 6, 10 кВ с изолированной нейтралью, выполненной воздушными линиями. Модель была построена в программном комплексе «Matlab» с применением пакета «Simulink» [44].

Рассмотрим подробно компьютерную модель электрической сети напряжением 6, 10 кВ. На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема этой сети.

На рисунке 3.2 представлен общий вид компьютерной модели сети с изолированной нейтралью. Следует отметить, что все элементы электрической сети представлены в виде блоков. Подобные блоки разработаны, во-первых, с целью выполнения модели электрической сети более компактной и функциональной, во-вторых, для создания моделей тех электротехнических

устройств, которых нет в стандартной библиотеке SimPowerSystems. Рассмотрим подробнее основные элементы компьютерной модели сети.

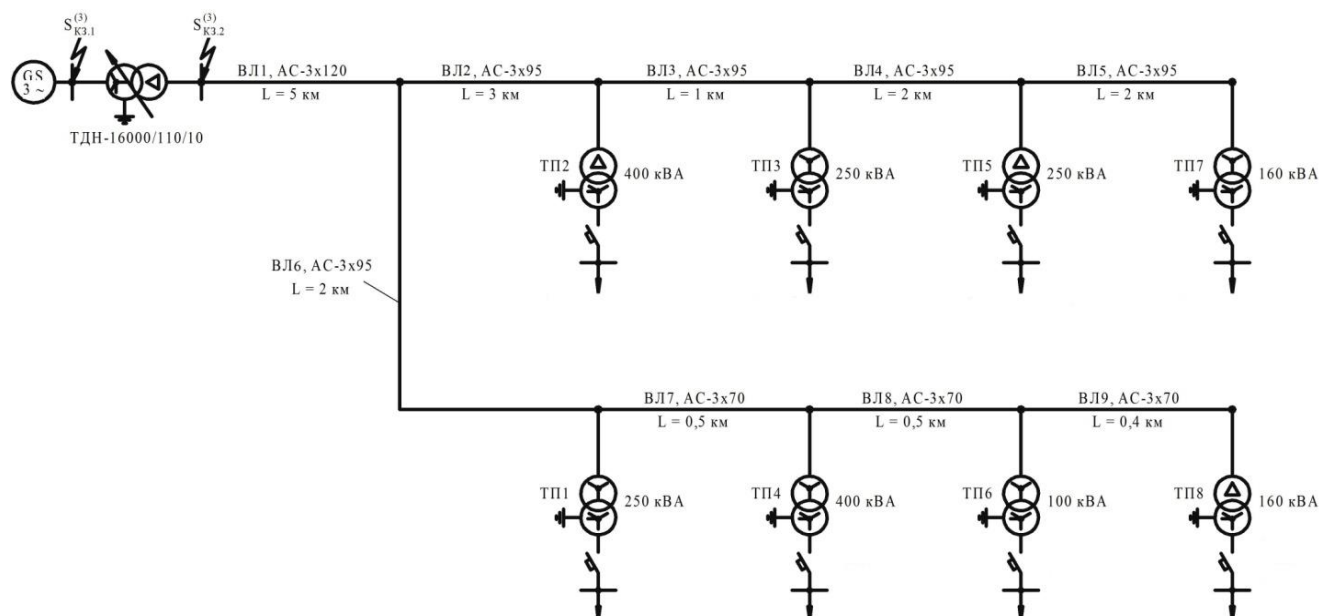


Рисунок 3. 1 – Принципиальная схема электрической сети напряжением 6, 10 кВ, выполненной воздушными линиями

Энергосистема моделируется с помощью стандартного блока 1 «Three-Phase Source» из библиотеки SimPowerSystem. Этот блок моделирует трехфазный источник питания. При моделировании задаются следующие параметры:

- действующее междуфазное напряжение, В;
- начальная фаза напряжения, равная 0° для фазы А;
- частота сети, Гц;
- активное сопротивление источника, Ом;
- индуктивность источника, Гц.

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

1) Полное сопротивление энергосистемы, Ом:

$$Z_{ЭС} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{КЗ}}, \quad (3.1)$$

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

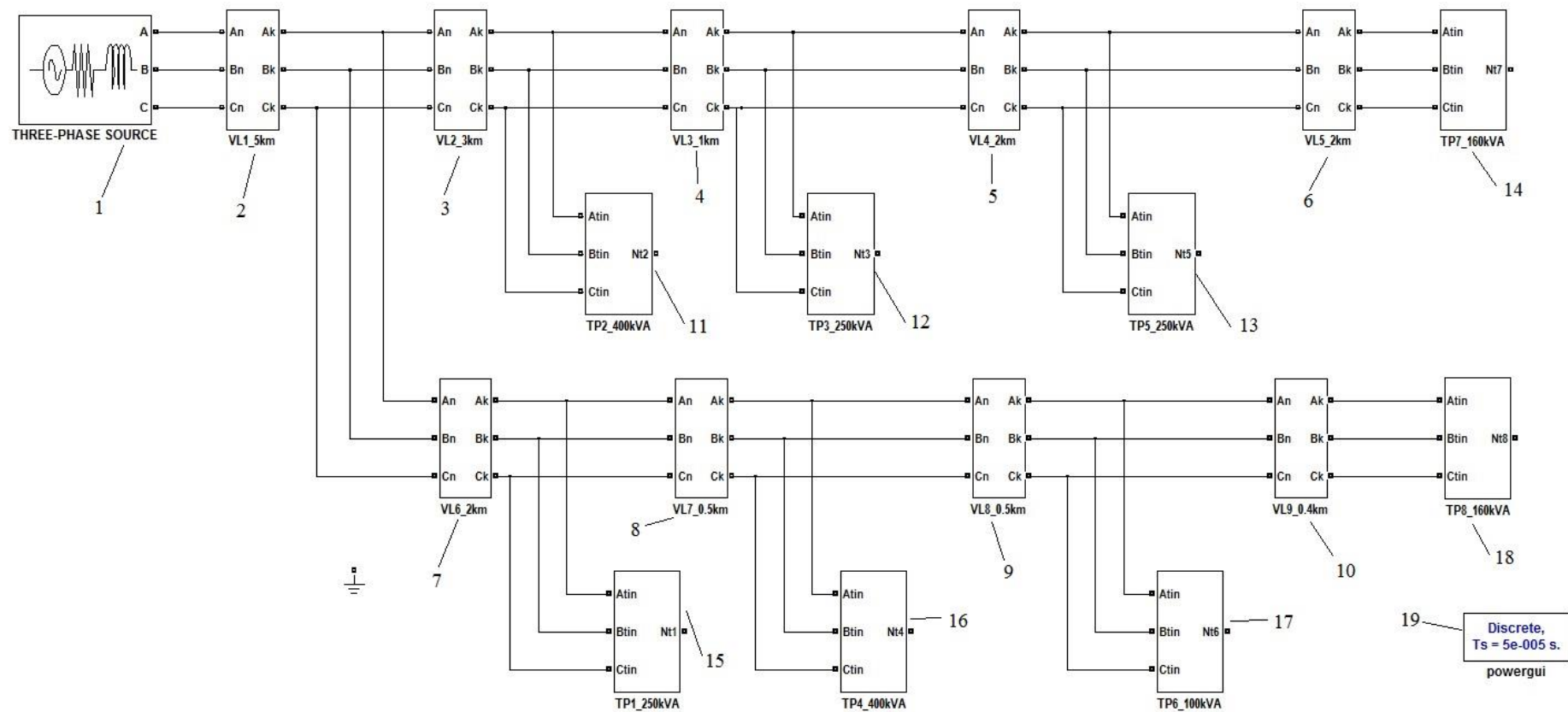


Рисунок 3.2 – Общий вид компьютерной модели электрической сети напряжением 6, 10 кВ с изолированной нейтралью:
 1 – трехфазный источник электроэнергии напряжением 6 – 10 кВ; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – блоки, моделирующие трехпроводные воздушные линии; 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 – блоки, моделирующие трансформаторные подстанции с нагрузками

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

2) Внутреннее активное сопротивление энергосистемы, Ом:

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

где K – отношение индуктивного сопротивления энергосистемы к ее активному сопротивлению [22].

Численное значение отношения K определяется по формуле:

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

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

$K_{уд}$ – ударный коэффициент.

3. Индуктивность источника, Гн:

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

где f – частота питающего напряжения, Гц.

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

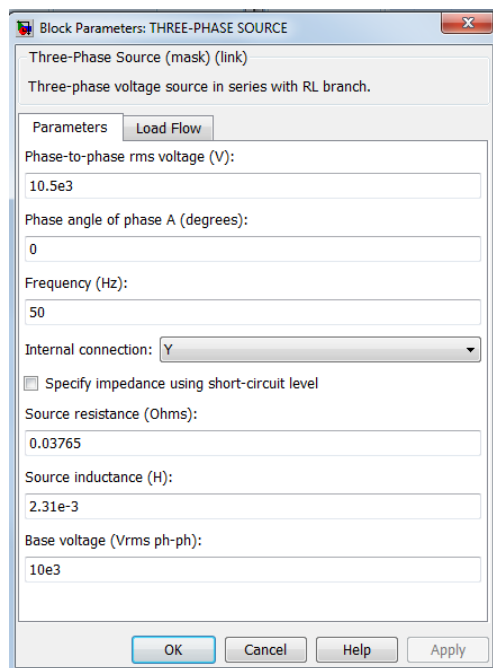


Рисунок 3.3 – Окно задания параметров блока «Three-Phase Source»

На рисунке 3.3 представлен внешний вид окна задания параметров источника питания.

Блоки 2 – 10 моделируют воздушные трехпроводные линии электропередачи напряжением 6, 10 кВ. Эти блоки не являются стандартными блоками библиотеки «SimPowerSystems», но собраны из других стандартных блоков. На рисунке 3.4 представлена схема одной из воздушных линий.

Блоки Q1 и Q2 при помощи стандартных блоков «Breaker» моделируют выключатели, установленные в каждую из трех фаз. Блок «3 Phase Measurement» представляют собой набор измерительных приборов, посредством которых в ходе исследований снимаются значения режимных параметров сети, в первую очередь величины токов и напряжений в фазах.

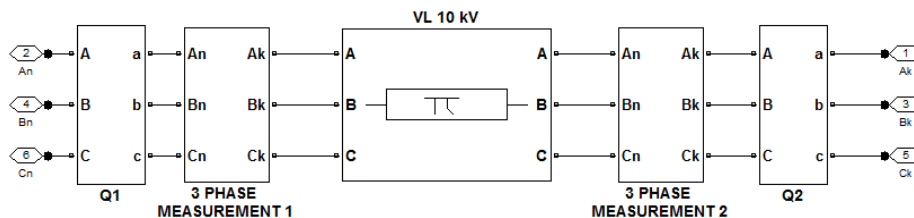


Рисунок 3. 4 – Схема блока «Трехпроводная воздушная линия»

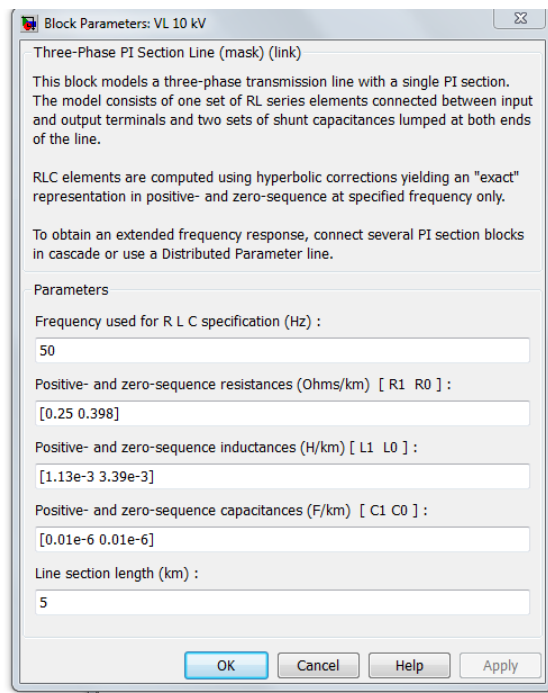


Рисунок 3. 5 – Окно задания параметров блока «Three-Phase PI Section Line»

В центре расположен блок «Three-Phase PI Section Line», который моделирует непосредственно трехфазную воздушную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами.

При моделировании линии задаются следующие параметры:

- частота сети, 50 Гц;
- удельное активное, индуктивное и емкостное сопротивление прямой и нулевой последовательностей на 1 км длины;
- длина линии, км.

В данной компьютерной модели были смоделированы 8 блоков с трансформаторными подстанциями, представляющие собой понижающие трансформаторы с различными значениями мощностей и схемами соединения обмоток, за которыми установлены выключатели, измерительные приборы и электрическая нагрузка.

Трансформаторы были смоделированы при помощи стандартных блоков «Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)». Особое внимание следует уделить определению параметров трансформаторов.

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток в относительных единицах:

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

где R_T – активное сопротивление трансформатора, Ом;

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

ко вторичной обмотке, Ом;

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

$S_{т. ном}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА.

Значение R_T определяется по выражению:

$$R_T = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{нн.ном}^2}{S_{т.ном}^2}, \quad (3.6)$$

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

Реактивное сопротивление трансформатора в относительных единицах определяется:

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

где Z_T – полное сопротивление трансформатора, Ом.

Полное сопротивление трансформатора определяется:

$$Z_T = \frac{U_{кз, \%}}{100\%} \cdot \frac{U_{нн, ном}^2}{S_{т, ном}} \quad (3.8)$$

Так как модель трансформатора требует задания параметров для нулевой последовательности, которые производителями трансформаторов, как правило, не приводятся в паспортных данных, то для получения их воспользуемся рекомендациями инструкции к блоку "Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)" [14, 19]. При этом учитываем, что в справочниках приводятся активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности, которые используем для определения запрашиваемых моделью трансформатора параметров.

Согласно инструкции к блоку, значения I_0 и P_0 рекомендуется находить путем проведения опыта холостого хода для нулевой последовательности, проводимого при соединении одной из групп обмоток в схему "разомкнутый треугольник". Учитывая вышесказанное, указанные параметры, независимо от схемы соединения обмоток Δ/Y_n или Y/Y_n , могут быть найдены с использованием схемы, представленной на рисунке 3.6 и приводимых в справочниках значений активного и индуктивного сопротивлений нулевой последовательности для трансформаторов со схемой соединения Y/Y_n [10, 32]

На рисунке 3.6, а приведена схема проведения опыта холостого хода для нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n , а её схема замещения – на рисунке 3.6, б. Так как в первичной обмотке, соединенной в звезду, ток нулевой последовательности не протекает, схема замещения (рисунок 3.6, б) преобразуется к виду (рисунок 3.6, в).

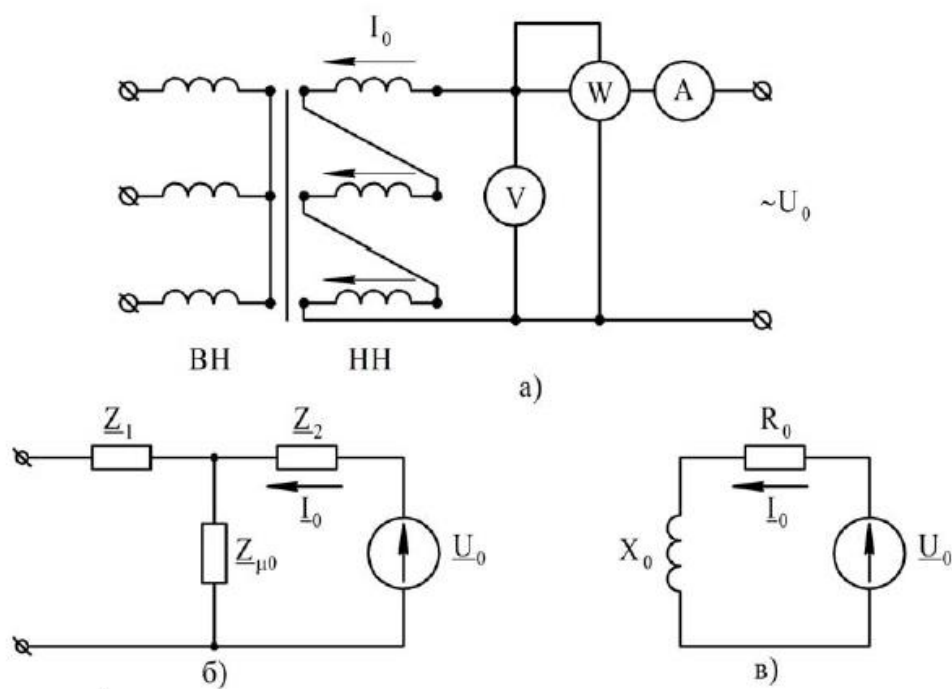


Рисунок 3.6 – Схема опытного определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду

Искомый ток I_0 , А определяется по выражению:

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

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

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

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

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

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

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

Активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме проведения указанного выше опыта холостого хода для нулевой последовательности, складывается из потерь во вторичных обмотках трансформатора, обусловленных

протеканием тока намагничивания тока I_0 , а также потерь в магнитопроводе и конструктивных элементах, обусловленных их перемагничиванием, и вихревыми токами, наведенными магнитными потоками нулевой последовательности [17].

Численное значение P_0 находится по выражению:

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

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора в относительных единицах определяется:

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

Электрическая нагрузка была смоделирована при помощи блоков «Parallel RLC Load», которые представляют собой параллельно подключенные резистор, индуктивность и емкость [8]. На рисунке 3.7 представлен общий вид данного блока.

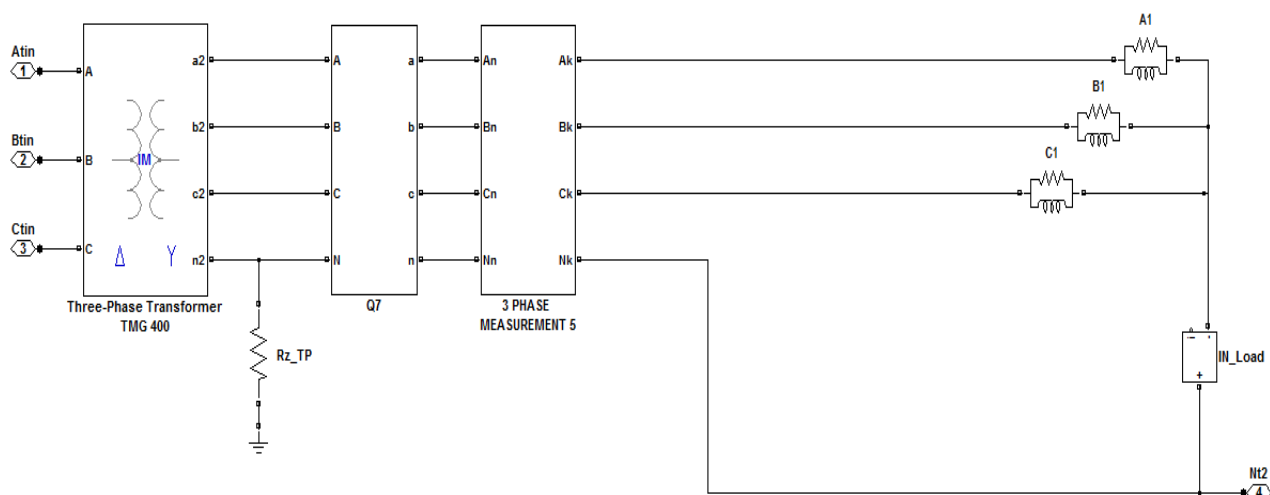


Рисунок 3.7 – Общий вид блока потребителей

В компьютерной модели присутствует блок 15 Powergui, который, согласно [46], является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

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

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

Для моделирования измерительных приборов используются стандартные измерительные блоки. Если возможностей стандартных блоков не хватает, создается новый измерительный комплекс в виде подсистемы из стандартных блоков. Измерительные комплексы "3 Phase measurement 1" и "3 Phase measurement 2" (рисунок 3.8) позволяют измерять:

- линейные напряжения;
- напряжения фаз относительно земли;
- симметричные составляющие напряжения и тока;
- токи в фазных проводах;
- дифференциальные токи.

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

- нормальный режим;
- обрывы фазных проводов ВЛ;
- обрыв и замыкание фазного провода в конце ВЛ через сопротивление, имитирующее сопротивление в месте замыкания;
- однофазное замыкание на землю.

3.2 Результаты исследований на компьютерной модели

Для исследования закономерностей изменения режимных параметров при аварийном состоянии сети было решено фиксировать, в первую очередь, значения симметричных составляющих напряжения. Первая серия опытов на компьютерной модели электрической сети напряжением 6, 10 кВ была проведена

при условии, что вся нагрузка сети была сосредоточена в ее конце, что обеспечило симметрию напряжений в фазах.

Значения симметричных составляющих напряжения при нормальном режиме работы сети представлены в таблице 3.1. Значения величин были измерены на питающей подстанции и каждой из 8 трансформаторных подстанций, расположенных на отпайках линии. Такое расположение измерительных приборов соответствует расположению счетчиков в реальной сети.

Таблица 3.1 – Значения симметричных составляющих напряжения при нормальном режиме работы сети

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6035	0	0
ТП1*	228,9	0	0
ТП2	227,9	0	0
ТП3	227,3	0	0
ТП4	228,8	0	0
ТП5	226,7	0	0
ТП6	227,8	0	0
ТП7	226,2	0	0
ТП8	229,9	0	0

*Здесь и далее аббревиатура ТП обозначает трансформаторную подстанцию. Измерения произведены на стороне низкого напряжения трансформатора 6, 10/0,4 кВ

Как видно из полученных результатов, при нормальном режиме работы сети напряжения обратной и нулевой последовательностей равны нулю.

Далее были смоделированы обрывы фазы А на 8 отпайках воздушной линии. Обрывы моделировались путем отключения одного полюса фазы от блока, моделирующего трансформаторную подстанцию. Таблицы 3. 2 – 3. 9 содержат данные о напряжениях прямой, обратной и нулевой последовательностей для каждого из смоделированных обрывов.

Таблица 3.2 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 1

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6041	13,6	271
ТП1	114,4	114,5	0
ТП2	229,5	2,053	0
ТП3	228,9	2,039	0
ТП4	114,4	114,4	0
ТП5	228,2	2,024	0
ТП6	113,9	113,9	0
ТП7	227,8	2,022	0
ТП8	114,9	115	0

Таблица 3.3 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 2

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6043	16,87	906,4
ТП1	230,8	2,542	1,837e-006
ТП2	113,9	114	2,228e-006
ТП3	113,6	113,7	7,781e-007
ТП4	230,7	2,541	2,784e-006
ТП5	113,3	113,4	3,122e-007
ТП6	229,77	2,53	1,042e-006
ТП7	113,1	113,1	1,778e-007
ТП8	231,8	2,553	8,086e-007

Таблица 3.4 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 3

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6040	10,4	717,8
ТП1	230,1	1,565	0
ТП2	229,9	2,378	0
ТП3	113,6	113,7	0
ТП4	230	1,564	0
ТП5	113,3	113,4	0
ТП6	229	1,554	0
ТП7	113,1	113,2	0
ТП8	231,1	1,572	0

Таблица 3.5 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 4

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6040	9,554	179,6
ТП1	230,4	1,936	0
ТП2	229	1,43	0
ТП3	228,4	1,424	0
ТП4	114,4	114,4	0
ТП5	227,8	1,42	0
ТП6	113,9	113,9	0
ТП7	227,3	1,419	0
ТП8	114,9	114,9	0

Таблица 3.6 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 5

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6038	6,397	356,3
ТП1	229,6	0,96	0
ТП2	229,1	1,461	0
ТП3	228,7	1,629	0
ТП4	229,5	0,96	0
ТП5	113,3	113,4	0
ТП6	228,6	0,958	0
ТП7	113,1	113,1	0
ТП8	230,6	0,97	0

Таблица 3.7 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 6

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6037	3,2	88,95
ТП1	229,4	0,64	0
ТП2	228,3	0,48	0
ТП3	227,7	0,47	0
ТП4	229,3	0,69	0
ТП5	227,1	0,48	0
ТП6	113,9	113,9	0
ТП7	226,6	0,46	0
ТП8	114,9	115	0

Таблица 3.8 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 7

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6037	2,46	$9,3 \cdot 10^{-5}$
ТП1	229,2	0,38	0
ТП2	228,4	0,57	0
ТП3	227,8	0,63	0
ТП4	229	0,38	0
ТП5	227,3	0,76	0
ТП6	228,1	0,37	0
ТП7	113,1	113,1	0
ТП8	230,2	0,38	0

Таблица 3.9 – Значения симметричных составляющих напряжения при обрыве фазы А на отпайке трансформаторной подстанции 8

Место расположения счетчика	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_0, В$
Питающая подстанция	6036	1,642	$7,48 \cdot 10^{-5}$
ТП1	229,1	0,32	0
ТП2	228,1	0,23	0
ТП3	227,5	0,246	0
ТП4	229	0,347	0
ТП5	226,9	0,23	0
ТП6	228,1	0,37	0
ТП7	226,4	0,24	0
ТП8	114,9	114,9	0

Измерительные приборы, установленные за трансформаторными подстанциями неповрежденного ответвления зафиксировали лишь небольшие

изменения величин симметричных составляющих напряжения по сравнению с нормальным режимом. Это позволяет сделать вывод что в данном ответвлении отсутствует аварийный режим.

Также полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при обрыве фазного провода воздушной линии на стороне высокого напряжения значения обратной и нулевой последовательностей, зафиксированные измерительными приборами, установленными на стороне низкого напряжения, значительно повышаются по сравнению с нормальным режимом работы сети.

В процессе анализа полученных значений режимных параметров была обнаружена зависимость между величиной напряжения обратной последовательности, измеренной на питающей подстанции, и удаленностью места обрыва от этой подстанции. На рисунке 3.8 представлен график, иллюстрирующий эту зависимость.

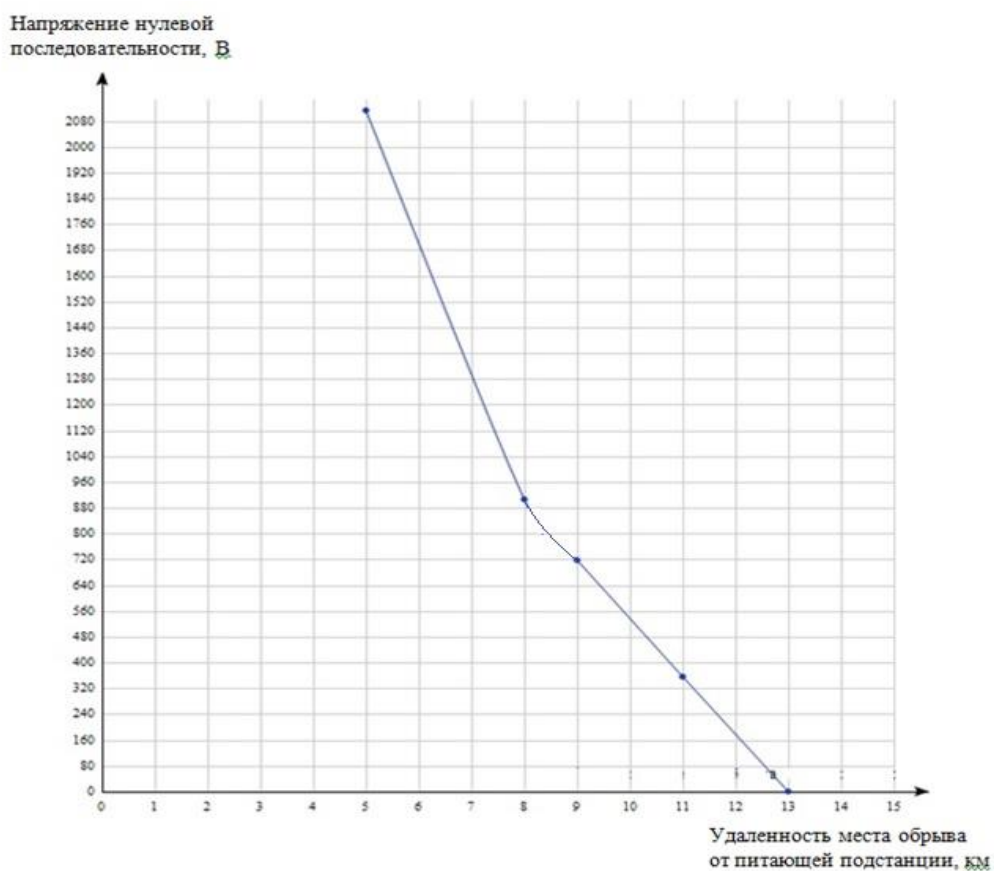


Рисунок 3.8 – Зависимость между величиной напряжения нулевой последовательности и удаленностью места обрыва от питающей подстанции

Точкам на графике соответствуют величины напряжения нулевой последовательности, измеренные на различном расстоянии от места обрыва фазного провода.

Следует отметить, что данная зависимость позволяет определять место обрыва фазного провода только на расстоянии не более 13 – 14 км, так как на больших расстояниях величина напряжения нулевой последовательности становится крайне мала.

3.3 Апробация и проверка адекватности компьютерной модели на опытной электрической сети

Как уже говорилось выше, опасности, связанные с аварийным режимом работы электрической сети не позволяют моделировать обрывы фазных проводов в действующей сети. По этой причине проведение экспериментов для проверки адекватности компьютерной модели было решено производить на электрической сети учебного полигона филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго». Данная электрическая сеть была построена «Челябэнерго» по разработанному в Южно-Уральском государственном университете (НИУ) проекту. Особенность этой сети заключается в том, что бытовое и производственное электрооборудование заменены нагрузочными сопротивлениями. Эту сеть можно назвать «опытной электрической сетью» [26].

На рисунке 3.9 представлена схема опытной электрической сети. Как видно из этой схемы питание воздушной линии (ВЛ) напряжением 380 В осуществляется от трансформаторной подстанции (ТП) «Лесная», которая располагается на территории полигона. ТП оснащена силовым трансформатором ТМГ мощностью 160 кВА. На концевой опоре со стороны высокого напряжения установлен разъединитель QS1. Питание ТП «Лесная» осуществлено по ВЛ напряжением 6, 10 кВ от подстанции (ПС) «Миасская» 110/10 кВ. На этой ПС установлены силовые трансформаторы типа ТМН мощностью 6300 кВА.

Протяженность воздушной линии 10 кВ составляет 330 м, выполнена линия проводом АС-3х50 мм².

Следует отметить, что при создании опытной электрической сети были использованы элементы (трансформаторы, провода), которые наиболее часто используются в распределительных сетях России. Сделано это было для того, чтобы различные процессы, протекающие в опытной электрической сети, были максимально приближены к реальным.

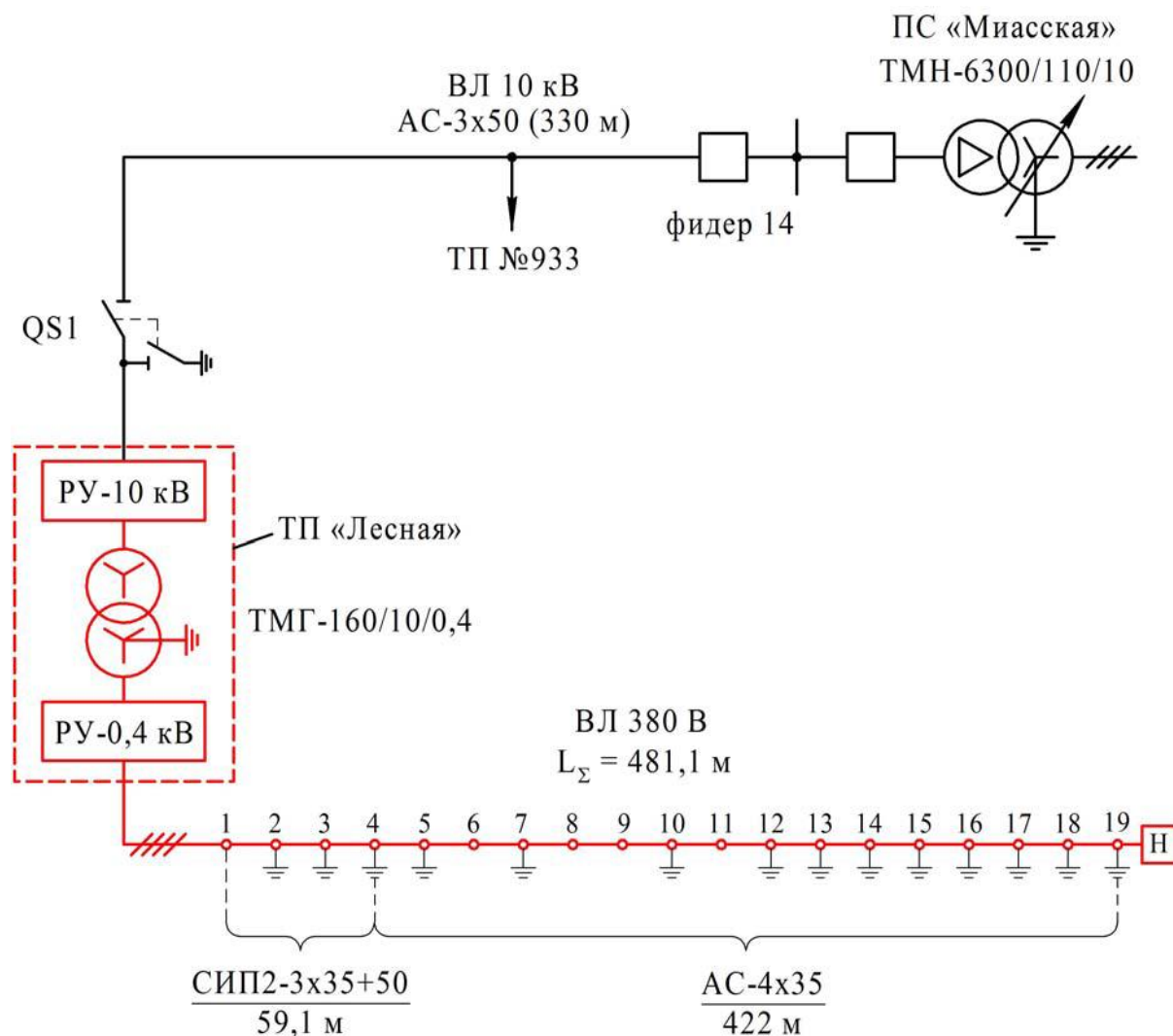


Рисунок 3.9 – Схема опытной электрической сети

Обрыв фазного провода ВЛ 6, 10 кВ моделировался следующим образом: посредством разъединителя QS1 ТП «Лесная» отключалась от питающей линии, затем в распределительном устройстве 10 кВ вынимался предохранитель одной из фаз, после чего разъединитель вновь включался. Измерительные приборы типа

«Ресурс-UF2M» фиксировали значения режимных параметров в ее начале ВЛ 380 В (в распределительном устройстве 0,4 кВ). Результаты измерений режимных параметров в нормальном режиме работы сети и при обрывах фазных проводов представлены в таблице 3. 10.

Таблица 3. 10 – Исследование режимов работы опытной электрической сети.

№ пп	Время	Напряжение, В					
		U_A	U_B	U_C	U_0	U_1	U_2
1. Нормальный режим работы							
1	12:33	242,10	242,15	242,97	0,10	242,12	0,91
2	12:34	241,95	242,07	242,83	0,12	242,83	0,92
3	12:35	242,22	242,31	243,04	0,10	242,18	0,91
2. Обрыв фазы А							
4	13:23	0,11	209,45	209,61	0,09	121,06	121,17
5	13:24	0,07	209,51	209,62	0,09	121,41	121,36
6	13:25	0,05	209,41	209,49	0,09	121,09	121,12
3. Обрыв фазы В							
7	13:45	208,65	0,75	209,36	0,23	104,32	104,28
8	13:46	208,35	0,69	209,13	0,23	104,14	104,16
9	13:47	208,43	0,68	209,17	0,24	104,22	104,27
4. Обрыв фазы С							
10	13:00	208,67	208,57	1,00	0,18	104,28	104,37
11	13:01	208,66	208,77	0,88	0,20	104,27	104,34
12	13:02	208,94	209,03	0,88	0,20	104,15	104,42

Для подтверждения адекватности компьютерной модели сравним полученные при моделировании обрыва на ТП 8 значения режимных параметров аварийного режима и значения, полученные при экспериментах в опытной электрической сети. Выбор ТП 8 для такого сравнения обусловлен идентичностью ее параметров с параметрами трансформатора ТМГ – 160/10/0,4. Сравнение результатов экспериментов на компьютерной модели и в опытной электрической сети представлены в таблице 3.11.

Из представленного сравнения результатов экспериментов можно сделать вывод, что компьютерная модель электрической сети напряжением 6, 10 кВ

обладает достаточной адекватностью для исследования взаимосвязи между режимом работы сети и значениями режимных параметров.

Таблица 3. 11 – Сравнение результатов экспериментов

	Компьютерная модель	Опытная электрическая сети
1. Нормальный режим работы		
$U_A, В$	229,9	242,09
$U_B, В$	229,9	242,17
$U_C, В$	229,9	242,95
$U_0, В$	0	0,1
$U_1, В$	229,9	242,4
$U_2, В$	0	0,91
2. Обрыв фазы А		
$U_A, В$	0	0,08
$U_B, В$	202,18	209,46
$U_C, В$	202,18	209,46
$U_0, В$	0	0,09
$U_1, В$	114,9	121,19
$U_2, В$	114,9	121,2

3.4 Выводы

После анализа результатов экспериментов, проведенных на компьютерной модели электрической сети и в опытной электрической сети можно сделать следующие выводы:

1) Компьютерная модель электрической сети напряжением 6, 10 кВ, построенная в программном комплексе «Matlab» с применением пакета «Simulink» позволяет проводить разнообразные исследования режимных параметров электрической сети, работающей как в нормальном, так и в аварийном режиме;

2) В электрических сетях напряжением 6, 10 кВ возможно определение наличия обрыва фазного провода по изменению величин симметричных составляющих напряжений, измеренных на стороне низкого напряжения линии, то есть на стороне вторичной обмотки понижающего трансформатора 6, 10/0,4 кВ;

3) По величине напряжения нулевой последовательности, измеренной на стороне высокого напряжения линии электропередачи 6, 10 кВ, возможно определение не только наличия обрыва фазного провода, но и его удаленности от питающей подстанции.

4 ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6, 10 КВ

Проведенные исследования на компьютерной модели электрической сети и в опытной электрической сети позволяют определить основные принципы построения и приступить к разработке системы мониторинга состояния воздушной линии напряжением 6, 10 кВ. Цель разработки такой системы – обеспечение максимально быстрого определения наличия аварийного режима сети, угрожающего людям, животным и электрическому оборудованию.

4.1 Повышение надежности распределительных сетей путем секционирования воздушной линии напряжением 380 В

При обрыве и последующем однофазном коротком замыкании (ОКЗ) фазного провода воздушной линии напряжением 380 В возникают опасности не только для людей, животных и электрического оборудования, но также увеличивает вероятность повреждения воздушной линии напряжением 6, 10 кВ. Обусловлено это повышением токов в фазных проводах на стороне высокого напряжения при обрыве провода на стороне низкого. Такое повышение токов может увеличивать нагрев проводника и снижает общую надежность воздушной линии [16]. Для обеспечения быстрого отключения линии 380 В при ОКЗ нами был разработан и защищен патентом [31] способ определения места установки устройств секционирования воздушной линии напряжением 380 В (Приложение А).

Для реализации этого способа необходимо последовательно проделать ряд действий. Во-первых производится расчет минимальных токов однофазного короткого замыкания (ОКЗ) $I_{К.МИН}^{(1)}$ для каждой точки L_i воздушной линии напряжением 380 В с учетом «теплого спада» и сопротивления дуги в месте замыкания, таким образом получается зависимость $I_{К.МИН}^{(1)} = f(L)$, после чего строится график функции изменения величины минимального тока ОКЗ от длины участка воздушной линии между трансформаторной подстанцией и точкой ОКЗ (рисунок 4.1).

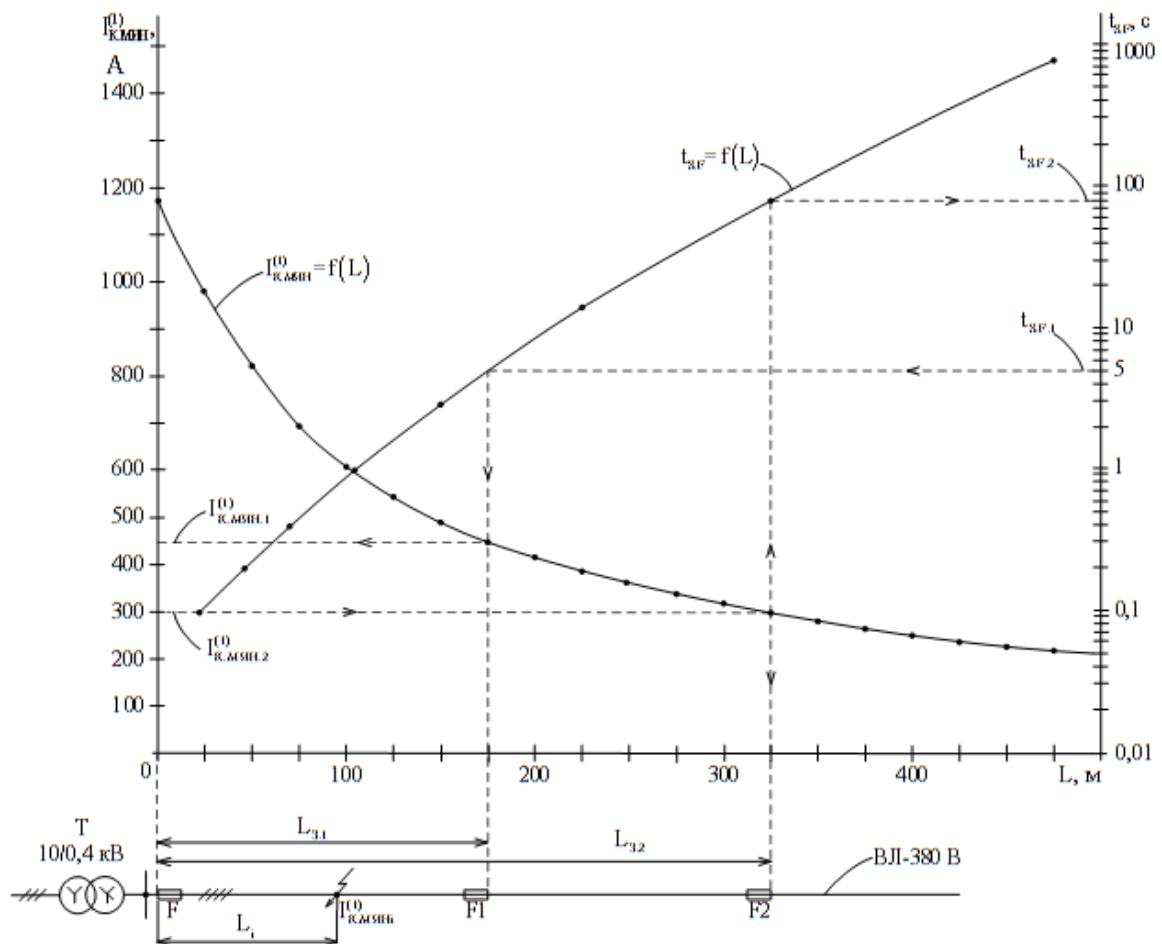


Рисунок 4.1 – Графическая интерпретация способа определения места установки устройств секционирования

Во-вторых подбирается по условиям отстройки от рабочих и пиковых токов электрической нагрузки номинальный ток $I_{F,НОМ}$ вставки плавкого предохранителя F и он устанавливается в трансформаторной подстанции в начале воздушной линии напряжением 380 В для её защиты.

В-третьих рассчитываются, используя паспортные времятоковые характеристики $t_F = f(I_F)$ вставки выбранного предохранителя [18] и график функции изменения величины минимального тока ОКЗ по длине участка воздушной линии $I_{K,МИН}^{(1)} = f(L)$, зависимость времени срабатывания $t_{ср,F}$ плавкого предохранителя от длины L защищаемой линии $t_{ср,F} = f(L)$ и эта зависимость строится на графике, приведённом на рисунке 4.1. Расчёт зависимости $t_{ср,F} = f(L)$ проводится в следующем порядке: Для каждого значения длины линии L_i по

графику $I_{К.МИН}^{(1)} = f(L)$ определяется значение минимального тока $I_{К.МИН}^{(1)}$. По паспортной времятоковой характеристике плавкого предохранителя $t_F = f(I_F)$, приведённой рисунке 4.2, для каждого значения тока ОКЗ $I_{К.МИН}^{(1)}$ и для каждой точки воздушной линии L_i находят соответствующее время $t_{S.Fi}$ срабатывания плавкого предохранителя – в результате получается зависимость $t_{S.F} = f(L)$ – изменение времени срабатывания $t_{S.F}$ плавкого предохранителя по длине воздушной линии L .

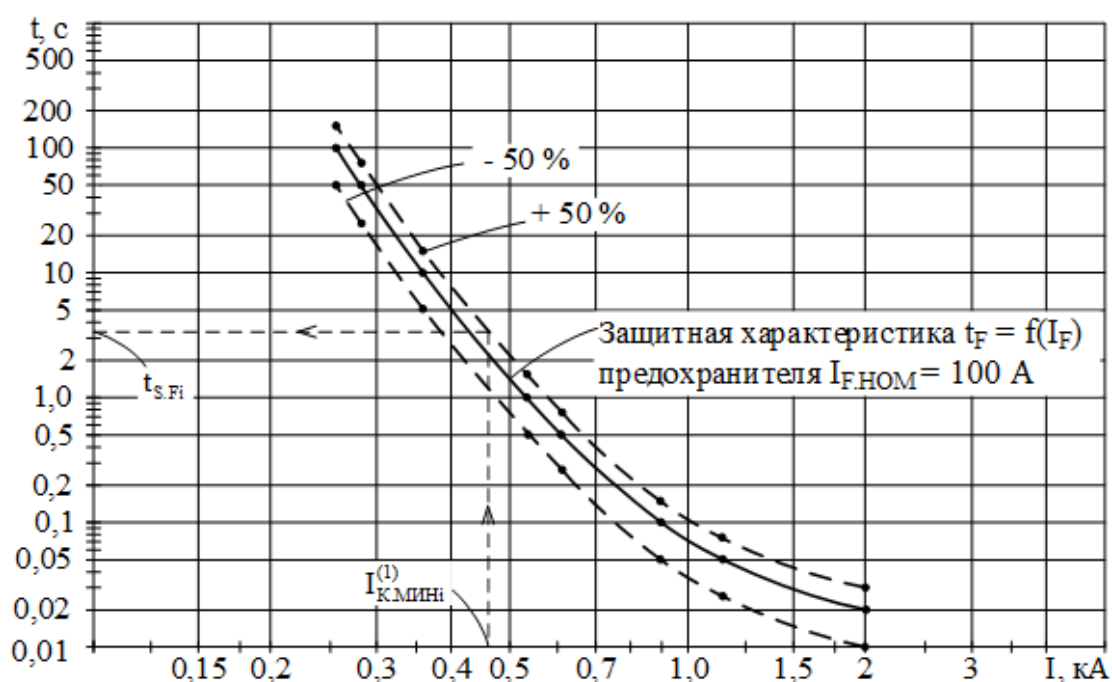


Рисунок 4.2 – Паспортная времятоковая характеристика плавкого предохранителя ПН2-100

В-четвертых определяется, в соответствии с требованиями ПУЭ, что время отключения линии при повреждении не должно превышать 5 секунд, по зависимости $t_{S.F} = f(L)$ зона защиты $L_{3.1}$ выбранного плавкого предохранителя F . В конце зоны защиты зоны защиты $L_{3.1}$ устанавливается секционирующий плавкий предохранитель $F1$ на ближайшей опоре, находящейся внутри зоны защиты $L_{3.1}$, если установленный в трансформаторной подстанции в начале воздушной линии плавкий предохранитель F не обеспечивает защиту всей линии со временем срабатывания менее 5 секунд. Причём номинальный ток вставки

секционирующего плавкого предохранителя F1 выбирают по условиям отстройки от рабочих и пиковых токов нагрузки оставшегося участка воздушной линии.

Таким образом, благодаря применению приведенного способа по всей длине воздушной линии напряжением 380 В может быть обеспечено аварийное отключение с временем срабатывания не более 5 секунд, тем самым становится возможным повышение уровня электробезопасности электрических сетей.

4.2 Описание системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ

В ходе проведенных исследований режимных параметров электрической сети было решено объединить методы определения уровня изоляции и возможность определения наличия и места обрыва фазного провода, на основании чего была разработана система мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ. Принципиальная схема этой системы представлена на рисунке 4.3. Система мониторинга представляет собой набор функциональных блоков, обменивающиеся информацией по каналам связи.

Разберем работу системы подробнее. Информация о режимных параметрах сети, зафиксированная микропроцессорными счетчиками, передается по GSM-каналу связи на блок анализа режимных параметров. Этот блок производит сравнение полученных значений режимных параметров с параметрами, характерными для нормального режима работы сети. Если эти значения совпадают в пределах допустимых отклонений, то делается вывод, что аварийный режим в сети отсутствует, воздушная линия работает в нормальном режиме. Здесь следует отметить, что анализ режимных параметров производится с некоторой временной задержкой, которая позволяет исключить ложное срабатывание системы при кратковременных отклонениях режимных параметров.

В случае, если отклонение режимных параметров от установленных нормальных значений по прошествии периода задержки не исчезло, блок анализа делает вывод, что электрическая сеть работает в аварийном режиме и передает

данные на блок вычисления состояния изоляции и блок определения обрыва фазного провода и расстояния до него.

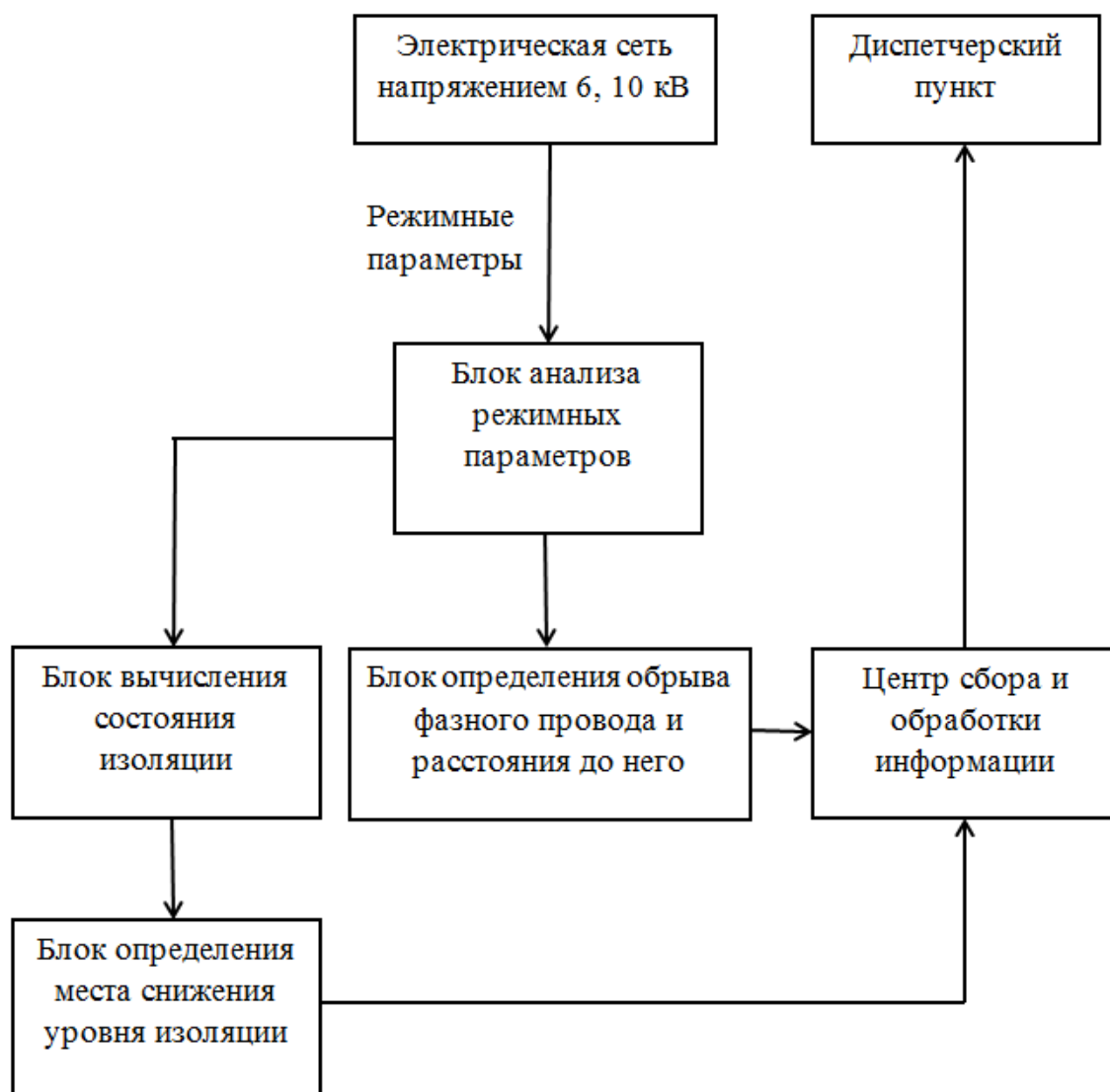


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема построения системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ

Блок вычисления состояния изоляции, используя принципы, описанные во второй главе определяет, имеет ли место в данной электрической сети снижение уровня изоляции. Если снижение уровня изоляции имеется, то в работу вступает следующий блок – блок определения места снижения уровня изоляции. Функционал этого блока позволяет достаточно точно вычислить расстояние до места локального снижения изоляции сети.

Блок определения обрыва фазного провода и расстояния до него, анализируя информацию о значениях симметричных составляющих напряжений делает вывод о наличии или отсутствии в воздушной линии обрыва фазного провода и определяет расстояние от питающей подстанции до места обрыва. Далее данные с этого блока и блока определения места снижения уровня изоляции передаются в центр сбора и обработки информации, после чего они поступают на диспетчерский пункт электрической сети. Благодаря этому дежурный диспетчер может в любой момент времени определить, в каком режиме в данный момент времени работает электрическая сеть и при возникновении аварийного режима оперативно принять меры к его устранению.

4.3 Выводы

Приведенные в данной главе принципы построения системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ позволяют сделать следующие выводы:

1) Повышение уровня надежности и электробезопасности распределительных электрических сетей возможно за счет применения разработанного и запатентованного нами способа определения места установки устройств секционирования воздушной линии напряжением 380 В;

2) Построение и применение системы мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ, состоящей из функциональных блоков позволит в любой момент времени определить, в каком режиме работает электрическая сеть;

3) Система мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ позволит оперативно выявлять такие повреждения электрических сетей, как локальное снижение уровня изоляции и обрыв фазного провода, благодаря чему можно существенно повысить уровень электробезопасности электрических сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной магистерской диссертации была разработана система мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ основанная на измерении величин режимных параметров.

Для того, чтобы разработать эту систему были решены следующие задачи:

- проведен анализ состояния вопроса и обоснованы задачи исследования;
- проведен анализ режимных параметров в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ;
- разработана компьютерная модель воздушной линии напряжением 6, 10 кВ в программном комплексе «Matlab»;
- исследованы взаимосвязи между величинами режимных параметров и состоянием сети;
- разработана система мониторинга состояния воздушной линии 6, 10 кВ.

На основании проведенного исследования могут быть сформулированы следующие выводы:

- в настоящее время отсутствуют средства и способы, позволяющие достаточно быстро и точно определить место обрыва фазного провода воздушной линии 6, 10 кВ;
- информация о режимных параметрах электрической сети может быть применена для определения наличия и места локального снижения изоляции и обрыва фазного провода;
- построенная в программном комплексе «Matlab» компьютерная модель электрической сети напряжением 6, 10 кВ позволяет проводить исследование режимных параметров сети, работающей как в нормальном, так и в аварийном режимах;
- в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ, выполненных воздушными линиями возможно определение расстояния до места обрыва фазного провода по величинам симметричных составляющих напряжения;

– разработанная система мониторинга состояния воздушных линий напряжением 6, 10 кВ позволит оперативно выявлять наличие и причину аварийного режима работы сети и принять меры к его устранению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конституция Российской Федерации: принята всенар. голосованием 12.12.1993 г. / Российская Федерация. Конституция (1993). – М.: Астрель, 2014. — 63 с.
2. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 38 с.
3. Айзенфельд, А. И., Фиксирующие индикаторы тока и напряжения ЛИФП-А, ЛИФП-В, ФПТ и ФПН / А.И. Айзенфельд, В.Н. Аронсон, В.Г. Гловацкий. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 88 с.
4. Андриевский, Е.Н. Эксплуатация электроустановок в сельском хозяйстве / Е.Н. Андриевский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 143 с.
5. Болдырев, И.В. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи в распределительных сетях / И.В. Болдырев, Л.В. Владимиров, В.А. Ощепков // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 205–208.
6. Будзко, И.А. Электрические сети / И.А. Будзко. – М.: Колос, 1967. – 327 с.
7. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Н.М. Зуль. – М.: ВО Агропромиздат, 1990. – 498 с.
8. Вагнер, К.Ф. Метод симметричных составляющих его применение к расчету аварийных токов / Пер. с англ. Л. Е. и М. Е. Сыркиных. Под ред. Н.Н. Щедрина / К.Ф. Вагнер, Р.Д. Эванс. – М. – Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1933. – 182 с.
9. Валеев, Р.Г. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB – SIMULINK / Р. Г. Валеев, А. В. Млоток, А. М. Ершов, А. И. Сидоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 116–128.
10. Васильева, Т.Н. Надежность и техническое обслуживание электроэнергетических систем в сельском хозяйстве / Т. Н. Васильева. – Рязань: Издательство ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2013. – 195 с.
11. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. Заведений. Изд. 2-е перераб. и доп. / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
12. Гессен, В.Ю. Аварийные режимы и защита от них в электрических сетях сельскохозяйственного назначения / В.Ю. Гессен. – М. – Л.: Сельхозгиз, 1955. – 369 с.
13. Глазунов, А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи / А.А. Глазунов. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
14. Городской, Д.А. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей с введением Фортескью К. Л.: учебное пособие для энергетических ВТУЗов / Д.А. Городской; пер. с англ. Л. Е. и М. Е. Сыркиных; под ред. Городского Д. А. – М. – Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 48 с.

15. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей / А. В. Григорьев, А. И. Селивахин, В. И. Сукманов. – Алма-Аты: Кайнар, 1984. – 128 с.
16. Ершов, А.М. Исследование аварийных режимов в сельских электрических сетях напряжением 380 В / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 6. – С. 18–21.
17. Каганович, Е.А. Испытания трансформаторов мощностью до 6300 кВА и напряжением до 35 кВ / Е.А. Каганович, И.М. Райхлин. – М.: Энергия, 1980. – 312 с.
18. Каталог 07.04.08-84 «Предохранители плавкие серии ПН2». Электротехника СССР. – М.: Информэлектро, 1985. – 4 с.
19. Козюков, В.А. Опытное определение параметров нулевой последовательности трансформаторов / В.А. Козюков, А.А. Пястолов // Электрические станции. – 1967. – №1. – С. 77–79.
20. Косоротова, Ю.В. Параметры изоляции относительно земли в распределительных электрических сетях 6, 10 кВ и организация их контроля: дис. ... канд. техн. наук / Ю.В. Косоротова. – Челябинск, 2005. – 172 с.
21. Комаров, Д. Т. Автоматизация электрических сетей 0,38–35 кВ в сельских районах / Д.Т. Комаров. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 112 с.
22. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крюčkова, В.А. Старшинова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 568 с.
23. Круг, К.А. Основы электротехники / К.А. Круг. – М. – Л.: ОНТИ, 1936. – 887 с.
24. Кузнецов, А. П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи / А.П. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 94 с.
25. Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / Лосев С.Б., Чернин А.Б. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 527 с.
26. Млоток, А.В. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В / А.В. Млоток, А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.И. Сидоров // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2014. – № 2 (19). – С. 96–107.
27. Нормы технологического проектирования электрических сетей сельскохозяйственного назначения. – М.: Сельэнергопроект, 1988. – 16 с.
28. ООО «ИЦ «Бреслер». – <http://www.ic-bresler.ru/produkty/#group38>.
29. ООО МНПП «Антракс». – <http://antraxenergo.ru>.
30. Охрана труда в России. – http://ohranatruda.ru/ot_biblio/articles/2168/.
31. Пат. 2610899 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Н 5/04 (2006,01). Способ определения места установки устройств секционирования воздушной линии напряжением 380 В / Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И., Тропин С.А. – № 2016100979; заявл. 13.01.2016; опубл. 17.02.2017, Бюл. №5 – 2 с.
32. Петров, Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы: учебник для вузов / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
33. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. – М.: ОАО «Россети», 2015. – 196 с.

- 34.Поспелов, Г.Е., Надежность электроустановок сельскохозяйственного назначения / Г.Е. Поспелов, В.И. Русан. – Минск: Ураджай, 1982. – 166 с.
- 35.Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. №242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 609 с.
- 36.Рожавский, С.М. Проблема несимметрии в сельских электрических сетях (Обзорная информ.) / С.М. Рожавский // Серия «Линии электропередачи и подстанции, сельская электрификация». – М.: Информэнерго, 1981. – 55 с.
- 37.Селивахин, А.И. Эксплуатация электрических распределительных сетей / А.И. Селивахин, Р.Ш. Сагутдинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 239 с.
- 38.Сельницын, А.А.,. Способ определения сопротивления изоляции сетей с изолированной нейтралью напряжением 6...35 кВ / А.А. Сельницын, А.И.Сидоров, Н.А. Бендяк // Контроль изоляции в распределительных сетях: тезисы докладов Научно-практической конференции. – 1992. – С. 15.
- 39.Сидоров, А.И. Анализ способов и средств определения места повреждения воздушных линий напряжением 6 – 35 кВ / А.И. Сидоров, Р.Г. Валеев, С.А. Тропин // Материалы LV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»; под ред. д. с-х. н., проф. М.Ф. Юдина. – Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2016. – Ч. IV. – С. 229 – 234.
- 40.Сидоров, А.И. Основы электробезопасности / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 314 с.
- 41.Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: дис. ... докт. техн. наук / А.И. Сидоров. – Челябинск, 1993. – 444 с.
- 42.Стасенко, Р.Ф., Автоматизация сельских электрических сетей / Р.Ф. Стасенко, П.П. Фещенко. – Киев: Техника, 1982. – 128 с.
- 43.Тропин, С.А. Использование микропроцессорных счетчиков в качестве элемента защиты при обрывах фазных проводов воздушной линии напряжением 6–10 кВ / С.А. Тропин, А.В. Хлопова // Безопасность и управление рисками: материалы III международной научно-практической конференции. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 165 – 171.
- 44.Тропин, С.А. Компьютерная модель электрической сети напряжением 10 (6) кВ / С.А. Тропин, Р.Г. Валеев, А.И. Сидоров // Материалы XI международной научно-практической конференции "Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах"; под ред. д.т.н., проф. И.Н. Коротова. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2015. – С.52-54.
- 45.Хусаинова, Н.А. Определение параметров изоляции относительно земли в распределительных сетях 6...35 кВ с изолированной нейтралью и источниками компенсации реактивной мощности на основе измерения режимных параметров: дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Хусаинова. – Челябинск, 2001. – 183 с.

46. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
47. Шабанов, В.А. Определение места повреждения в распределительных сетях при однофазных замыканиях на землю: учеб. Пособие / В.А. Шабанов. – Уфа.: Изд-во УНГТУ, 2003. – 96 с.
48. Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ / А. И. Шалин // Новости электротехники – 2006. – №1. – С. 24 – 27.
49. Электроснабжение промышленных предприятий / Н.А. Казак, Б. А. Князевский, С. С. Лазарев, Д. С. Лившиц. – М.: Энергия, 1966. – 535 с.
50. Электротехнический справочник. В 4 т. Т.1: Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергия, 1982. – 656 с.
51. Электротехнический справочник. В 4 т. Т.3: Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 964 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение «Способ определения места установки устройств секционирования воздушной линии напряжением 380 В»



Авторы: *Ершов Александр Михайлович (RU), Валеев Рустам
Галимянович (RU), Сидоров Александр Иванович (RU), Тропин
Сергей Александрович (RU)*