

На правах рукописи



Хлопова Анна Владимировна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Безопасность жизнедеятельности».

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор **Сидоров Александр Иванович**.

Официальные оппоненты:

Лещинская Тамара Борисовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ», г. Москва;

Ощепков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита состоится «25» июня 2019 г., в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте ЮУрГУ:

https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/dissertaciya_hlopova_a.v.4.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7(351)-267-91-23, e-mail: grigorevma@susu.ac.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.298.05
д-р техн. наук, доцент

 М.А. Григорьев

Актуальность работы. По данным Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» на 2016 год протяжённость воздушных линий напряжением 6–10 кВ (ВЛ 6–10 кВ) составляла 962 933,5 км или 46,5 % от протяжённости ВЛ напряжением 0,38–110 кВ. Доля ВЛ 6–10 кВ, находящихся в эксплуатации, со сверхнормативным сроком службы составила 50 %, в связи с этим показатели надёжности электроснабжения распределительных электрических сетей 6–10 кВ за последние годы снижаются.

Анализ статистических данных показывает, что наиболее травмоопасным в электрических сетях является оборудование класса напряжения 6–10 кВ.

Одной из распространённых аварийных ситуаций в линиях напряжением 6–10 кВ является обрыв фазного провода воздушной линии электропередачи и, как правило, возникающее при этом однофазное замыкание на землю.

Электрические сети напряжением 6–10 кВ, образованные воздушными линиями, работают в основном в режиме изолированной нейтрали, при котором обрыв провода и его падение на землю не приводят к срабатыванию релейной защиты и, соответственно, снятию напряжения с линии. Такие ВЛ могут находиться в работе длительное время, пока не будет обнаружено повреждение. Это создаёт опасную ситуацию для жизни людей и животных, оказавшихся вблизи места обрыва, а также может стать причиной возникновения пожара. Несмотря на наличие достаточно большого количества существующих способов и устройств защиты, предназначенных для сигнализации и / или отключения сети при возникновении обрыва провода воздушных линий напряжением 6–10 кВ, в настоящее время отсутствует их широкое внедрение.

Работа согласуется с Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» и концепцией «Цифровая трансформация 2030», принятой ПАО «Россети» 21 декабря 2018 года.

Степень научной разработанности проблемы.

Вопросами обеспечения безопасности при обрывах фазных проводов занимались такие учёные, как П.А. Долин, Т.В. Ерёмина, А.А. Красных, Т.Б. Лещинская, О.К. Никольский, А.И. Сидоров и другие.

Значительный вклад в решение вопроса обнаружения и / или отключения обрывов проводов ВЛ 6–10 кВ внесли учёные и специалисты: Г.И. Атабеков, А.В. Григорьев, А.М. Ершов, Н.М. Зуль, В.Ю. Кабашов, А.М. Манилов, В.А. Ощепков, Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов, А.И. Федотов, М. Vezjak и другие. В своих разработках устройств защиты при обрыве провода в сети с изолированной нейтралью авторы упоминают используемые режимные параметры, но не приводят их количественные характеристики.

Вместе с этим возможности обеспечения безопасности при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ изучены не в полном объёме. Недостаточно широко исследованы режимы работы сети при обрыве провода ВЛ 6–10 кВ, а существующие способы и устройства защиты требуют определения количественных значений уставок, характеризующих режимы работы.

Цель работы – обеспечение безопасности путём разработки устройства защиты при обрыве фазного провода воздушных линий напряжением 6–10 кВ.

Задачи исследования:

1 Выполнить исследования симметричных составляющих напряжений, возникающих в электрической сети при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ.

2 Выявить зависимости изменения симметричных составляющих напряжения сети при различных режимах работы и параметрах сети 6–10/0,38 кВ.

3 Разработать устройство защиты при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ.

4 Оценить изменение длительности существования электроопасной ситуации в результате применения разработанного устройства защиты.

Объект исследования: воздушные линии электропередачи напряжением 6–10 кВ при возникновении в них обрыва фазного провода.

Предмет исследования: выявление закономерностей изменения напряжений в электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ при возникновении обрыва фазного провода 6–10 кВ, позволяющих разработать защиту при указанном режиме.

Научная новизна основных положений и результатов, выносимых на защиту:

– установлены зависимости изменения симметричных составляющих напряжений, возникающие при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ в электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ с изменяющейся несимметричной фазной нагрузкой и различными параметрами сети;

– обоснованы место установки устройства защиты и входной режимный параметр для его работы;

– полученные зависимости изменения напряжения обратной последовательности при различных режимах работы электрической сети 6–10/0,38 кВ позволили сформировать дополнительные функции для микропроцессорного счётчика электроэнергии с целью использования их для выявления обрыва фазного провода ВЛ 6–10 кВ;

– предложена система автоматического выявления повреждённого участка ВЛ, которая может быть использована как подсистема интеллектуальной электрической сети;

– выполнена оценка изменения длительности существования электроопасной ситуации в результате применения разработанной системы автоматического выявления участка ВЛ 6–10 кВ с обрывом фазного провода.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 Полученные зависимости изменения напряжения обратной последовательности при различных режимах работы электрической сети 6–10/0,38 кВ позволили определить зону изменения уставок для устройства защиты ВЛ 6–10 кВ при обрыве фазного провода.

2 Результаты исследований изменений напряжений легли в основу разработки устройства защиты ВЛ 6–10 кВ при обрыве фазного провода (патент РФ на изобретение № 2633803).

3 Разработана система автоматического выявления повреждённого участка ВЛ 6–10 кВ.

4 В результате применения разработанной системы выявления повреждённого участка ВЛ 6–10 кВ будет уменьшено время определения места обрыва фазного провода и, следовательно, длительность существования электроопасной ситуации.

Методы исследования. При проведении работы использованы положения теоретических основ электротехники, теории электробезопасности, теории подобия, методы компьютерного и физического моделирования, эксперименты в опытной электрической сети.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности научных положений и результатов исследований подтверждается сопоставлением полученных результатов с помощью компьютерного и физического моделирования с результатами экспериментальных исследований в опытной электрической сети напряжением 10/0,38 кВ.

Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на: 68-й и 69-й научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ЮУрГУ, г. Челябинск, 2016, 2017; XVII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов «Молодёжные инновации повышения эффективности и надёжности транспорта газа», г. Екатеринбург, 2016; VII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи», г. Казань, 2016; III Международной научно-практической конференции «Безопасность и управление рисками», г. Пермь, 2016; IV и V Всероссийских студенческих конференциях (с международным участием) «Безопасность жизнедеятельности глазами молодёжи», г. Челябинск, 2017, 2019; IX и X научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ, г. Челябинск, 2017, 2018; III и IV Международных научно-технических конференциях «Пром-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, 2017, г. Москва, 2018; I Международной научно-практической конференции «Наука XXI

века: технологии, управление, безопасность», г. Курган, 2017; Международной научной конференции «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития», г. Челябинск, 2018.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведённые в диссертации, соответствуют области научных исследований пункта 3 специальности 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика): разработка методов контроля, оценки и нормирования опасных и вредных факторов производства, способов и средств защиты от них.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 3 статьи в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 3 публикации, индексируемые в базе Scopus, получен патент РФ на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 183 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 10 приложений. Содержит 255 страниц, в том числе 156 страниц основного текста, включающего в себя 30 рисунков и 31 таблицу, и 99 страниц приложений.

Автор выражает глубокую благодарность к. т. н., доценту кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» ЮУрГУ (НИУ) А.М. Ершову за научные консультации и методическую помощь в подготовке диссертации.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования; определены объект и предмет исследования; изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; приведены основные положения и результаты работы, выносимые на защиту; отражены сведения о степени достоверности и апробации полученных результатов.

В первой главе на основании изучения научно-технической и отраслевой литературы проведён анализ повреждаемости ВЛ 6–10 кВ. Анализ аварийных отключений воздушных линий 6–110 кВ, проведённый в ряде энергосистем России и стран ближнего зарубежья, показывает, что до 70 % отключений приходится на сети напряжением 6–10 кВ. Аварии, происходящие в таких сетях, часто заканчиваются массовым повреждением основных элементов воздушных линий: опор, проводов и их креплений. 76 % аварийных отключений происходит именно на воздушных линиях. Аналогичная ситуация и за рубежом – большинство повреждений (72,8 %) в сетях среднего напряжения (11–33 кВ) с изолированной нейтралью происходит на воздушных линиях. Одной из наиболее распространённых аварийных ситуаций

в линиях напряжением 6–10 кВ является обрыв фазного провода. По данным различных источников количество обрывов фазного провода достигает 12 % от общего числа повреждений в сетях 6–10 кВ.

Исследования травматизма в российской электроэнергетике, проведенные А.А. Красных, выявили, что наиболее травмоопасным в электрических сетях является оборудование напряжением 6–10 кВ, около 75 % смертельных травм происходит вследствие поражения электрическим током в сетях 6–10 кВ и 31 % – на воздушных линиях 6–10 кВ.

Обзор существующих методов и средств защиты показал наличие большого перечня авторских свидетельств и патентов на изобретения, публикаций и монографий, в которых описываются устройства и методы построения защиты ВЛ при обрыве фазного провода, предложенные в основном в 1970–1980-х годах. Однако существовавший уровень развития электроники не позволил их реализовать в полной мере.

Развитие микропроцессорной техники и различного рода современных средств связи привело к появлению микропроцессорных устройств защиты, включающих в себя функцию «защита от обрыва фазы». В литературе отсутствует описание исследований, направленных на разработку методик по определению уставок которые необходимы для их правильного функционирования. В связи с этим такие устройства мало распространены на практике.

Во второй главе проведён анализ технических характеристик ВЛ 6–10 кВ филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» (рисунок 1), показавший, что в целом распределительные электрические сети напряжением 6–10 кВ построены по радиальному принципу с отпайками. Линии одноцепные, большинство имеет одностороннее питание. Длины ВЛ достигают 44 км вместе с отпайками, а длины магистральных участков – 24 км. Среднее количество отпайек от ВЛ невелико и лежит в диапазоне 4–8 шт., при этом их максимальное количество может достигать 30 шт. Среднее количество ТП, подключённых к одной ВЛ 6–10 кВ, равно 10, а их средняя суммарная мощность составляет 2 МВ·А.

Выполнен анализ статистических данных по повреждаемости ВЛ 6–10 кВ филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» за период 2012–2016 гг. в результате которого установлено, что в распределительных электрических сетях «Челябэнерго» напряжением 6–10 кВ на каждые 100 км линий приходится в среднем в год 0,702 обрыва фазных проводов, а наибольшее количество обрывов фазных проводов (31 %) происходит в результате климатических и атмосферных воздействий. Выявлено, что 81 % обрывов приходится на провода ВЛ 6–10 кВ 1970–1980-х годов изготовления и ранее. При этом 50 % оборванных проводов находилось в эксплуатации больше нормативного срока, вплоть до 77 лет. Максимальное число обрывов проводов ВЛ 6–10 кВ наблюдается в октябре при температурах окружающей

среды от $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это обусловлено рядом причин, в частности, ветровой нагрузкой и вероятностью лёдообразования на проводах.

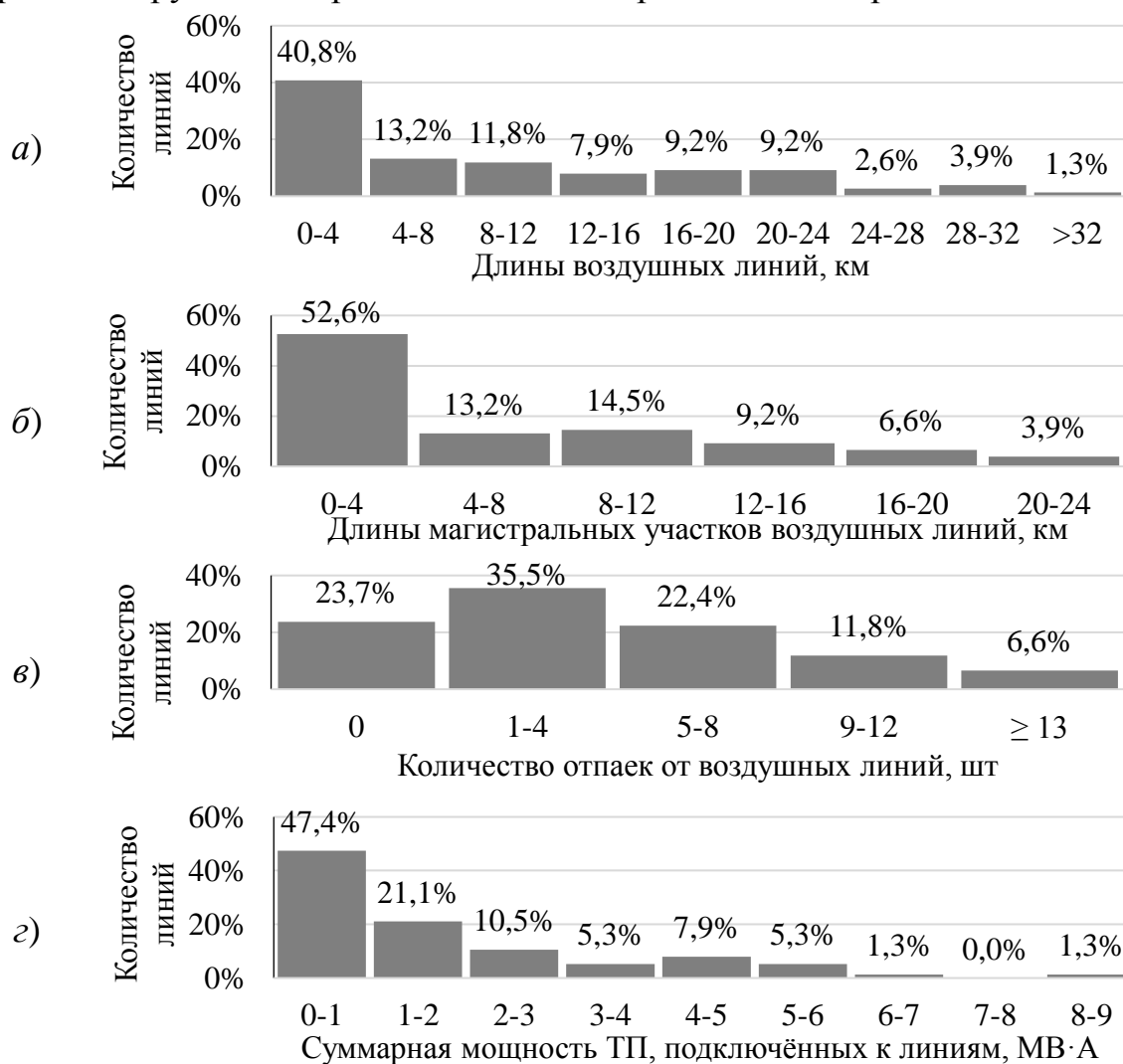


Рисунок 1 – Распределения ВЛ 6–10 кВ сетей Челябэнерго: *а* – по длинам линий; *б* – по длинам магистральных участков; *в* – по количеству отпаяк от ВЛ; *г* – по суммарной мощности подключённых ТП

В третьей главе проведено исследование изменений напряжений в электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ, возникающих при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема трёхфазной электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ и рассматриваемые режимы её работы.

На режимные параметры работы электрической сети 6–10/0,38 кВ в общем случае влияют:

- состояние воздушных линий 6–10 кВ и 380 В. Они могут находиться в нормальном режиме работы (НР), в линиях могут происходить обрывы фазных (ОФ) и нулевого (ОНП) проводов, а также могут возникать различные виды замыканий;

- изменение несимметрии фазных нагрузок потребителей 380 В;
- изменение места повреждения в линиях 6–10 кВ и 380 В;
- изменение параметров электрической сети: длина ВЛ 6–10 кВ, различные схемы соединения обмоток понижающего трансформатора, его степень загрузки и мощность, различные сечения проводов ВЛ 6–10 кВ.

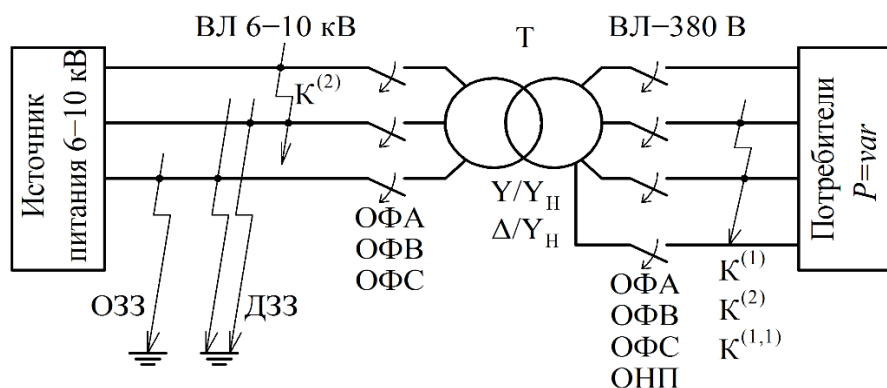


Рисунок 2 – Исследуемая электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ и режимы её работы: ОФА, ОФВ, ОФС – обрыв фазного провода, соответственно фазы А, В, С; ОНП – обрыв нулевого провода; $K^{(1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$ – однофазное короткое замыкание (КЗ), двухфазное КЗ и двухфазное КЗ на нулевой провод; ОЗЗ, ДЗЗ – однофазное, двойное замыкание на землю

Составлен перечень семнадцати возможных режимов работы электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ, включающий в себя различные сочетания повреждений в линиях 6–10 кВ и 380 В.

Режимные параметры, которые можно использовать в качестве критерия выявления ОФ: фазные токи, протекающие в ВЛ 6–10 кВ; ток обратной последовательности, возникающий в ВЛ 6–10 кВ; линейные и фазные напряжения, измеряемые в электрической сети 6–10 кВ и в сети 380 В; напряжение нулевой и обратной последовательностей, возникающие в сети 6–10 кВ и в сети 380 В.

Фазные токи и ток обратной последовательности (I_2) в значительной степени зависят от величины тока нагрузки, к тому же токи, как и фазные и линейные напряжения подвержены искажению при значительной несимметрии нагрузки по фазам, что затрудняет их использование для выявления обрыва фазного провода ВЛ 6–10 кВ. Наиболее информативными режимными параметрами в выявлении обрыва фазного провода в ВЛ 6–10 кВ являются напряжение нулевой U_0 и напряжение обратной U_2 последовательностей.

Исследования изменений симметричных составляющих напряжений были проведены с помощью трёх инструментариев. Во-первых, разработана и применена компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ в программном комплексе MATLAB с использованием пакета

Simulink. Для проверки достоверности компьютерных исследований использовано физическое моделирование. Основные результаты исследований на компьютерной и физической моделях подтверждены экспериментами в опытной электрической сети напряжением 10/0,38 кВ, которая расположена на полигоне «Челябэнерго» и состоит из реальных воздушной линии напряжением 10 кВ, трансформаторной подстанции с трансформатором 10/0,4 кВ и воздушной линии напряжением 380 В с нагрузкой на её конце.

Для исследования в качестве аналога взята среднестатистическая электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ.

Защиты, реагирующие на изменения информационных параметров при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ, могут устанавливаться в четырёх характерных точках электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ (рисунок 3):

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

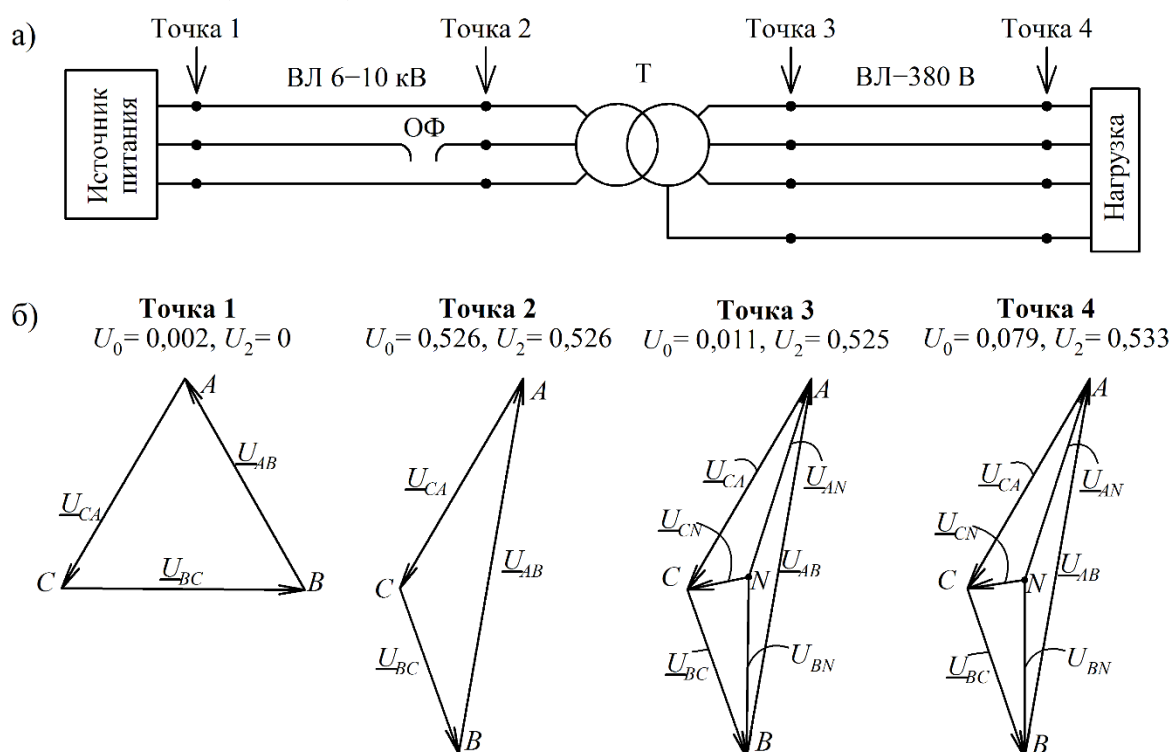


Рисунок 3 – Характерные точки установки защит в электрической сети 6–10/0,38 кВ (а); векторные диаграммы напряжений при обрыве провода фазы В при несимметричной нагрузке потребителя в разных точках сети 10/0,38 кВ, полученные при компьютерном моделировании (б)

Исследование изменений напряжений в электрической сети 10/0,38 кВ по её длине в четырёх точках проведены для четырёх режимов работы: НР и три режима обрыва провода фазы А, В и С в ВЛ-10 кВ. При исследовании были учтены следующие четыре предельных варианта изменения несимметрии нагрузки потребителей напряжением 380 В по фазам: 1) $P_A = P_B = P_C = 100\%$ – симметричная нагрузка; 2) $P_A = 0\%$, $P_B = P_C = 100\%$ – нагрузка отсутствует в фазе А; 3) $P_A = P_B = 0\%$, $P_C = 100\%$ – нагрузка отсутствует в двух фазах А и В; 4) $P_A = P_B = P_C = 0\%$ – нагрузка отсутствует во всех фазах ВЛ-380 В – «холостой ход».

На рисунке 3, б показан пример изменения векторных диаграмм напряжений в различных точках электрической сети при обрыве провода фазы В и несимметричной ($P_A = P_B = 0$, $P_C = 100\%$) нагрузке потребителя.

На рисунке 4 приведено сравнение изменений напряжений нулевой и обратной последовательностей в разных точках электрической сети, полученных при исследованиях на компьютерной (КМ) и физической (ФМ) моделях, а также в опытной электрической сети (ОЭС). Напряжения представлены в относительных единицах (о. е.): напряжение нулевой последовательности приведено к соответствующим фазным напряжениям, а напряжение обратной последовательности – к соответствующим линейным напряжениям, измеренным в четырёх характерных точках при работе сети 10/0,38 кВ на холостом ходу, т. е. при отсутствии нагрузок потребителей, подключённых к ВЛ-380 В.

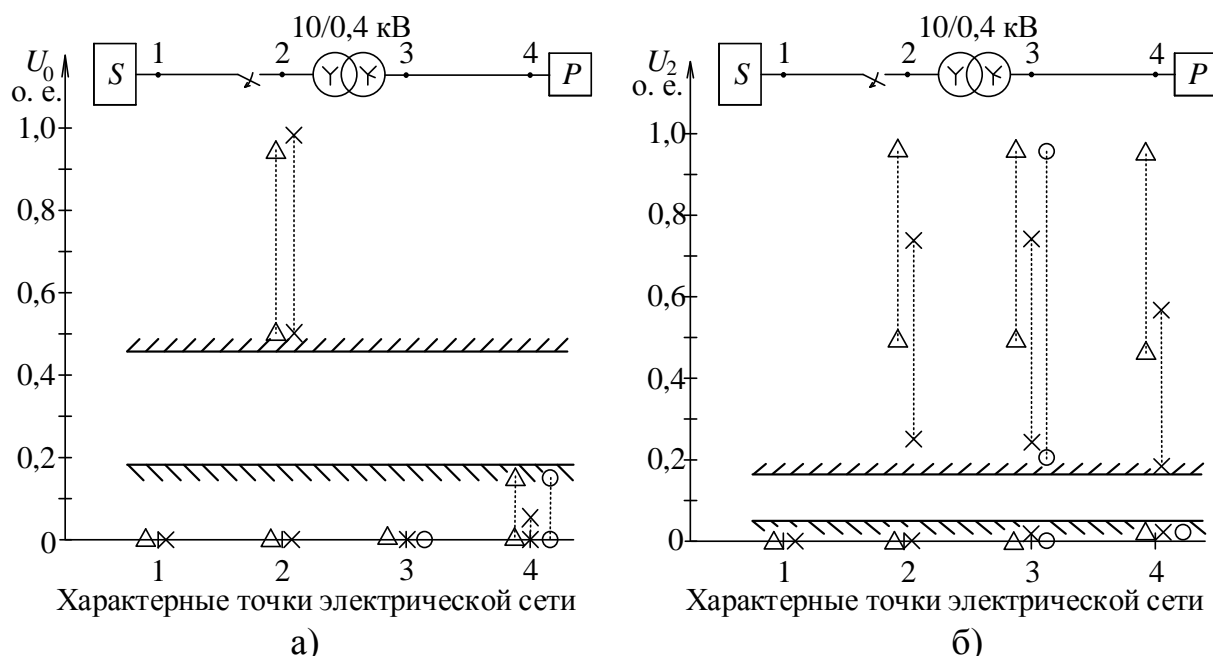


Рисунок 4 – Изменения напряжений нулевой U_0 (а) и обратной U_2 (б) последовательностей в разных точках электрической сети 10/0,38 кВ,

полученные на КМ (Δ), ФМ (\times) и в ОЭС (\circ):

$\backslash\backslash\backslash$ – область нормального режима работы ВЛ-10 кВ;

\lll – область обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ

Из рисунков 3 и 4 следует, что напряжение U_0 несёт информацию об обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ только в точке 2. Через понижающий трансформатор это напряжение не проходит. Напряжение U_2 об обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ несёт информацию в точках 2, 3 и 4, причём на стороне высшего и низшего напряжения понижающего трансформатора оно изменяется одинаково.

Из этого следует, что при выборе информационного параметра предпочтительнее использовать напряжение нулевой последовательности в точке 2 или напряжение обратной последовательности в точках 2, 3, 4. При выборе места установки защиты стоит отдавать предпочтение схемам надёжным, простым и дешёвым в установке и обслуживании. На стороне низшего напряжения понижающего трансформатора (в точке 3) устройства защиты можно организовать без каких-либо специальных согласующих устройств, в частности, без трансформаторов напряжения, т. е. они получаются конструктивно проще. В связи с этим **выбрано место установки устройства защиты – точка 3, а в качестве информационного параметра для построения защиты – напряжение U_2 .**

На рисунке 5 представлены подробные результаты исследования напряжений в точке 3 – векторные диаграммы напряжений в четырёх режимах работы (нормальный режим работы сети и три режима обрыва провода фазы А, В и С ВЛ-10 кВ). В каждом режиме были учтены четыре предельных варианта как несимметричной, так и симметричной нагрузки. Отметим, что векторные диаграммы, построенные по результатам КМ, совпадают с векторными диаграммами, полученными при экспериментах в ОЭС.

В таблице 1 представлены сводные данные исследований напряжения обратной последовательности в точке 3 с понижающими трансформаторами, имеющими разные схемы соединения обмоток Y/Y_H и Δ/Y_H , полученные при исследованиях на компьютерной и физической моделях, а также в опытной электрической сети. Результаты показали не только качественное, но и хорошее количественное совпадение.

Данные исследования позволили сделать выводы о:

- корректном построении компьютерной и физической моделей, результаты исследований которых совпадают с экспериментальными данными, полученными в опытной электрической сети;
- пригодности результатов компьютерного моделирования для дальнейшего анализа изменения напряжения U_2 в точке 3;
- независимости результатов исследований от схемы соединения обмоток понижающего трансформатора. В связи с этим дальнейшие исследования проведены с трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Y_H .

Для оценки работоспособности устройства защиты были проведены исследования влияния режимов работы сети, изменения места повреждения и параметров сети на U_2 . Выявлено, что изменение места повреждения или параметров сети оказывает незначительное влияние на результаты U_2 .

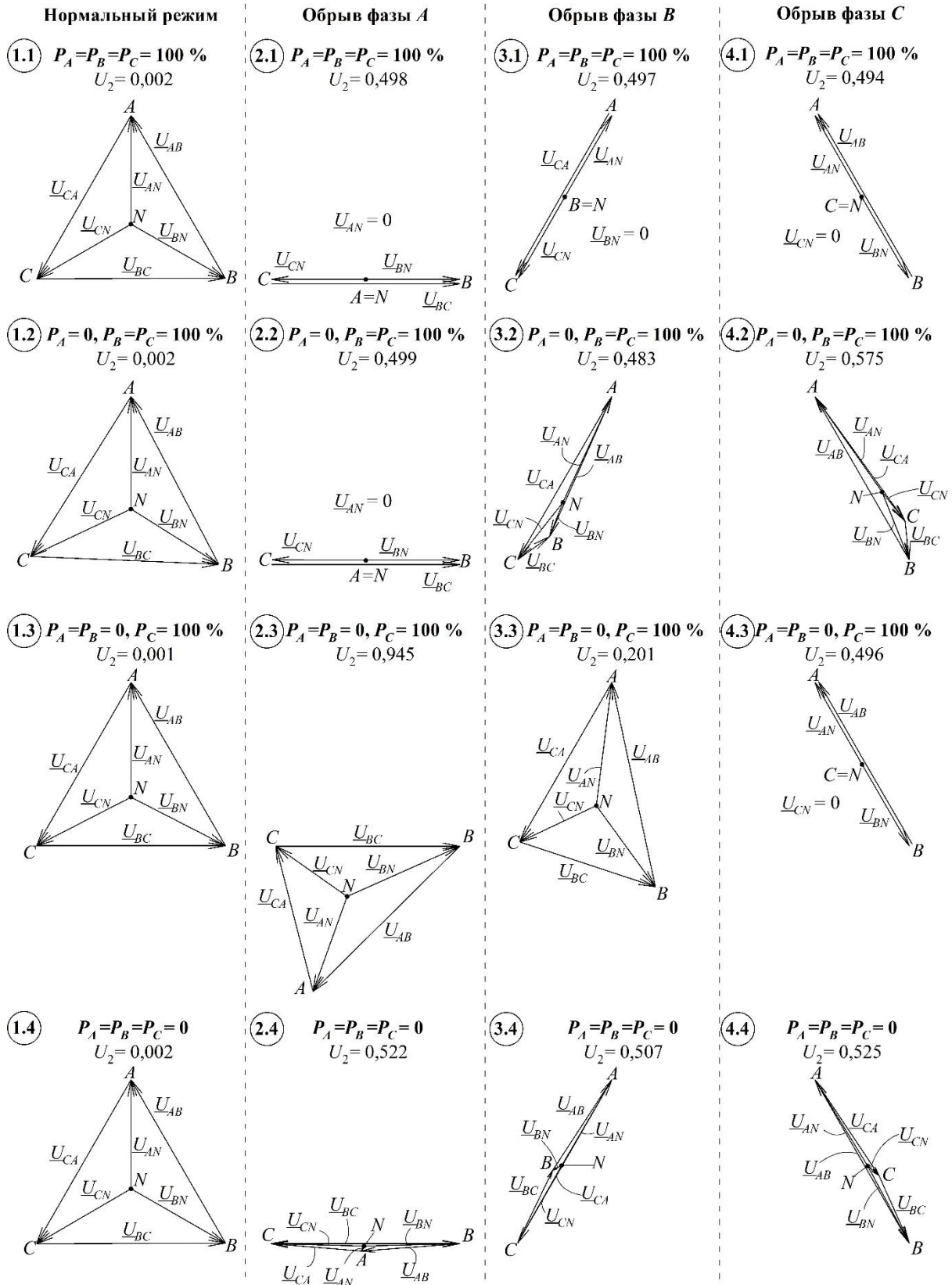


Рисунок 5 – Векторные диаграммы напряжений на стороне НН силового трансформатора, полученные при экспериментах в ОЭС

Таблица 1 – Результаты исследований напряжения U_2 на компьютерной (КМ) и физической (ФМ) моделях и в опытной электрической сети (ОЭС)

Режим работы ВЛ-10 кВ	Нагрузка по фазам, %			Напряжение обратной последовательности U_2 , о. е.				
				при группе соединения обмоток трансформатора Y/Y _H -0			при группе соединения обмоток трансформатора Δ/Y _H -11	
	P_A	P_B	P_C	КМ	ФМ	ОЭС	КМ	ФМ
Нормальный	100	100	100	0	0,009	0,002	0	0,004
	0	100	100	0,004	0,019	0,002	0,004	0,016
	0	0	100	0,003	0,015	0,001	0,003	0,013
	0	0	0	0	0,008	0,002	0	0,005
Обрыв провода фазы А	100	100	100	0,497	0,426	0,498	0,497	0,471
	0	100	100	0,497	0,447	0,499	0,679	0,618
	0	0	100	0,950	0,741	0,945	0,616	0,617
	0	0	0	0,500	0,515	0,522	0,500	0,503
Обрыв провода фазы В	100	100	100	0,497	0,487	0,497	0,497	0,477
	0	100	100	0,489	0,371	0,483	0,478	0,335
	0	0	100	0,525	0,242	0,201	0,498	0,500
	0	0	0	0,500	0,505	0,507	0,500	0,513
Обрыв провода фазы С	100	100	100	0,497	0,549	0,494	0,497	0,500
	0	100	100	0,572	0,670	0,575	0,499	0,514
	0	0	100	0,500	0,564	0,496	0,515	0,403
	0	0	0	0,500	0,502	0,525	0,500	0,491

Выше описано исследование четырёх режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ (нормальный режим и поочерёдные обрывы фазного провода ВЛ-10 кВ при изменении фазной несимметрии потребителей 380 В), которые устройство защиты должно чётко идентифицировать как основные режимы. Однако при эксплуатации сети возможны другие режимы, которые связаны с различного рода повреждениями. Повреждения сети могут появляться как отдельные события, например, только в сети 10 кВ или 380 В, или события могут происходить одновременно.

В таблице 2 приведены минимальные и максимальные значения напряжения U_2 для семнадцати режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ., полученные в результате исследований на КМ, ФМ и в ОЭС.

На рисунке 6 показаны диапазоны возможных значений напряжения U_2 в семнадцати режимах. На этом же рисунке показана зона действия уставок шириной 0,05–0,17 о. е. Значение уставки устройства защиты принято равным среднему значению $U_{2,уст} = 0,1$ о. е.

Проведём анализ возможности использования устройства защиты при различных режимах работы сети.

1 Режимы 1, 5, 8–10 относятся к нормальным режимам для ВЛ-10 кВ, при которых напряжение U_2 не превышает 0,019 о. е., что меньше значения

уставки $U_{2.уст}$, т. е. режим определится верно (устройство защиты сработает правильно).

Таблица 2 – Граничные значения U_2 при различных режимах работы электрической сети

Номер режима	Режим ВЛ-10 кВ	Режим ВЛ-380 В	Инструмент	U_{2min} , о. е.	U_{2max} , о. е.		
1	НР	НР	КМ	0	0,009		
			ФМ	0,008	0,019		
			ОЭС	0,001	0,002		
2–4	ОФ	НР	КМ	0,301	1,0		
			ФМ	0,242	0,741		
			ОЭС	0,201	0,945		
5	НР	$K^{(1)}$	КМ	0	0,009		
6	НР	$K^{(2)}$	КМ	0,025	0,496		
7	НР	$K^{(1,1)}$	КМ	0,022	0,467		
8	НР	ОФ	КМ	0	0,009		
9	НР	Обрыв двух фаз	КМ	0	0,007		
10	НР	ОНП	КМ	0	0,011		
11	ОФ	Режимы 5, 8–10	КМ	0,291	1,0		
12	ОЗЗ	Режимы 1–5, 8–10	КМ	0	0,012		
13	ОФ+ОЗЗ со стороны источника	Режимы 1–5, 8–10	КМ	0,3	0,992		
14	ОФ+ОЗЗ со стороны потребителя	Режимы 1–5, 8–10	КМ	0,201	1,0		
15	ОФ+ОЗЗ с двух сторон при $R_{зам}$	10 Ом	Режимы 1–5, 8–10	КМ	0	0,013	
				100 Ом	КМ	0	0,021
				1000 Ом	КМ	0,301	0,329
16, 17	$K^{(2)}$, ДЗЗ	Режимы 1–5, 8–10	КМ	0,491	0,501		

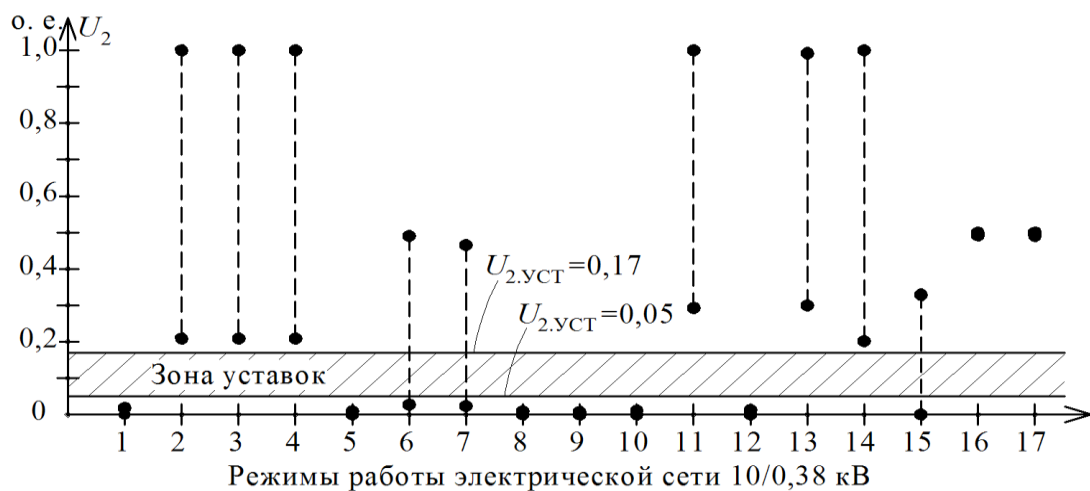


Рисунок 6 – Предельно возможные значения напряжения U_2 при различных режимах в электрической сети 10/0,38 кВ

2 При возникновении в ВЛ-380 В двухфазного КЗ или двухфазного КЗ на нулевой провод (режимы 6, 7) напряжение U_2 может превышать значение $U_{2.уст}$. Такие повреждения в сети 380 В должны отключаться защитами, установленными в начале ВЛ-380 В, в течение от нескольких долей секунды до нескольких секунд. Для того, чтобы устройство защиты ВЛ-10 кВ не реагировало на эти повреждения, в устройстве необходимо предусмотреть выдержку времени длительностью 10–20 секунд, чтобы дать возможность защитам ВЛ-380 В сработать. Учитывая это дополнение, устройство защиты ВЛ-10 кВ должно сработать правильно.

Примечание. Известны случаи, когда защита ВЛ-380 В при удалённых КЗ срабатывает со временем десятки секунд и более или не срабатывает совсем. В этом случае разрабатываемое устройство защиты ВЛ-10 кВ по истечении выдержки времени сработает и выдаст сигнал о наличии повреждения, т. е. выполнит роль резервной защиты.

3 При режимах 2–4, 11, 13, 14, когда происходит обрыв фазного провода ВЛ-10 кВ, напряжение U_2 превышает значение уставки $U_{2.уст}$. Следовательно, можно говорить о чётком срабатывании критерия обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ и правильном реагировании устройства защиты.

4 При обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ и его падении на землю с двух сторон (режим 15) при небольших значениях сопротивления замыкания $R_{зам}$ напряжение U_2 меньше значения уставки $U_{2.уст}$, и устройство защиты ВЛ-10 кВ не сработает. При сопротивлении $R_{зам} \geq 100$ Ом напряжение U_2 может оказаться больше уставки, и устройство сработает.

5 В режиме 12 (однофазное замыкание на землю в сети 10 кВ) напряжение U_2 не превышает значения уставки, устройство не среагирует на этот вид повреждения сети 10 кВ.

6 При двухфазном КЗ и двойном замыкании на землю в сети 10 кВ (режимы 16 и 17) напряжение U_2 превышает уставку. Такие КЗ должны отключаться защитами ВЛ-10 кВ. В случае, если эти повреждения ВЛ-10 кВ по каким-то причинам не будут отключены, то предлагаемое устройство защиты по истечении выдержки времени 10–20 секунд сработает и выдаст сигнал об аварии на ВЛ-10 кВ.

Проведённый анализ показал, что устройство защиты ВЛ-10 кВ при обрыве фазного провода должно правильно выделять нормальные и аварийные режимы работы электрической сети 10/0,38 кВ. Исключение составляет режим 15 – обрыв провода ВЛ-10 кВ и замыкание его на землю с двух сторон. Здесь устройство сработает правильно только при определённых условиях.

В четвёртой главе проведена классификация известных защит ВЛ 6–10 кВ при обрыве фазного провода, показавшая, что:

– для построения защиты ВЛ 6–10 кВ используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжений и напряжений фаз относительно земли; изменения обратной и нулевой составляющих в напряжениях и токах электрической сети; иные параметры;

– для выявления режимов работы ВЛ 6–10 кВ используют следующие основные виды функциональных блоков: первичные ёмкостные и индуктивные фильтры напряжений обратной и нулевой последовательностей, измерители тока, устанавливаемые на ВЛ 6–10 кВ; вторичные фильтры напряжений обратной и нулевой последовательностей, устанавливаемые во вторичных цепях; логические схемы анализа режима.

Защиту ВЛ 6–10 кВ можно построить с использованием отдельных традиционных устройств защиты. С развитием интеллектуальных электросетей (Smart Grid), когда всё больше трансформаторных подстанций напряжением 6–10/0,4 кВ снабжаются интегрированными устройствами релейной защиты, автоматики и учёта электрической энергии, устанавливаемыми на стороне низшего напряжения, в том числе внедряются микропроцессорные счётчики электрической энергии, производящие цифровое измерение токов и напряжений и передачу информации по каналам связи на диспетчерский пункт. Поэтому устройство защиты ВЛ 6–10 кВ целесообразно совместить с трёхфазным микропроцессорным счётчиком электрической энергии, соответствующим образом дополнив его программное обеспечение.

Проведённые исследования позволили сформировать дополнительные функции для микропроцессорного счётчика с целью их использования для выявления обрыва фазного провода ВЛ 6–10 кВ. Разработано устройство защиты на основе микропроцессорного счётчика, устанавливаемого на стороне низшего напряжения трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ [Пат. 2633803 Рос. Федерация].

В микропроцессорный счётчик электрической энергии, в состав которого входит блок измерения линейных напряжений, введён дополнительный блок, который состоит из последовательно соединённых блока вычисления напряжения обратной последовательности, преобразователя напряжения обратной последовательности в логический сигнал с минимальной уставкой по напряжению, блока исключения случайных срабатываний, блока преобразования логического сигнала в сигнал канала связи и передающего модема канала связи. Передающий модем канала связи связан с каналом передачи аварийного сигнала и предназначен обеспечивать передачу информации на диспетчерский пункт электрических сетей.

Такое устройство защиты не требует установки дополнительной аппаратуры и специальных согласующих устройств, в частности, трансформаторов напряжения, производя непосредственное измерение фазных и линейных напряжений 380 В. Защита реагирует на обрывы фазных проводов в любой точке воздушной линии напряжением 6–10 кВ, расположенной от питающей подстанции до ТП.

Проведено испытание разработанного устройства защиты с использованием данного счётчика на физической модели, которое показало принципиальную возможность использования микропроцессорного счётчика, дополненного определёнными функциями, в качестве устройства защиты при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ.

На основании разработанного устройства защиты ВЛ 6–10 кВ предложена система автоматического определения участка ВЛ с обрывом фазного провода (рисунок 7). Принцип работы системы: в конце каждого из ответвлений ВЛ 6–10 кВ на конечных трансформаторных подстанциях на стороне низшего напряжения должны быть установлены микропроцессорные счётчики с дополнительными функциями. И в зависимости от местоположения повреждённого участка ВЛ диспетчеру электрической сети будут поступать сигналы от одного или нескольких устройств защиты, установленных после места обрыва.

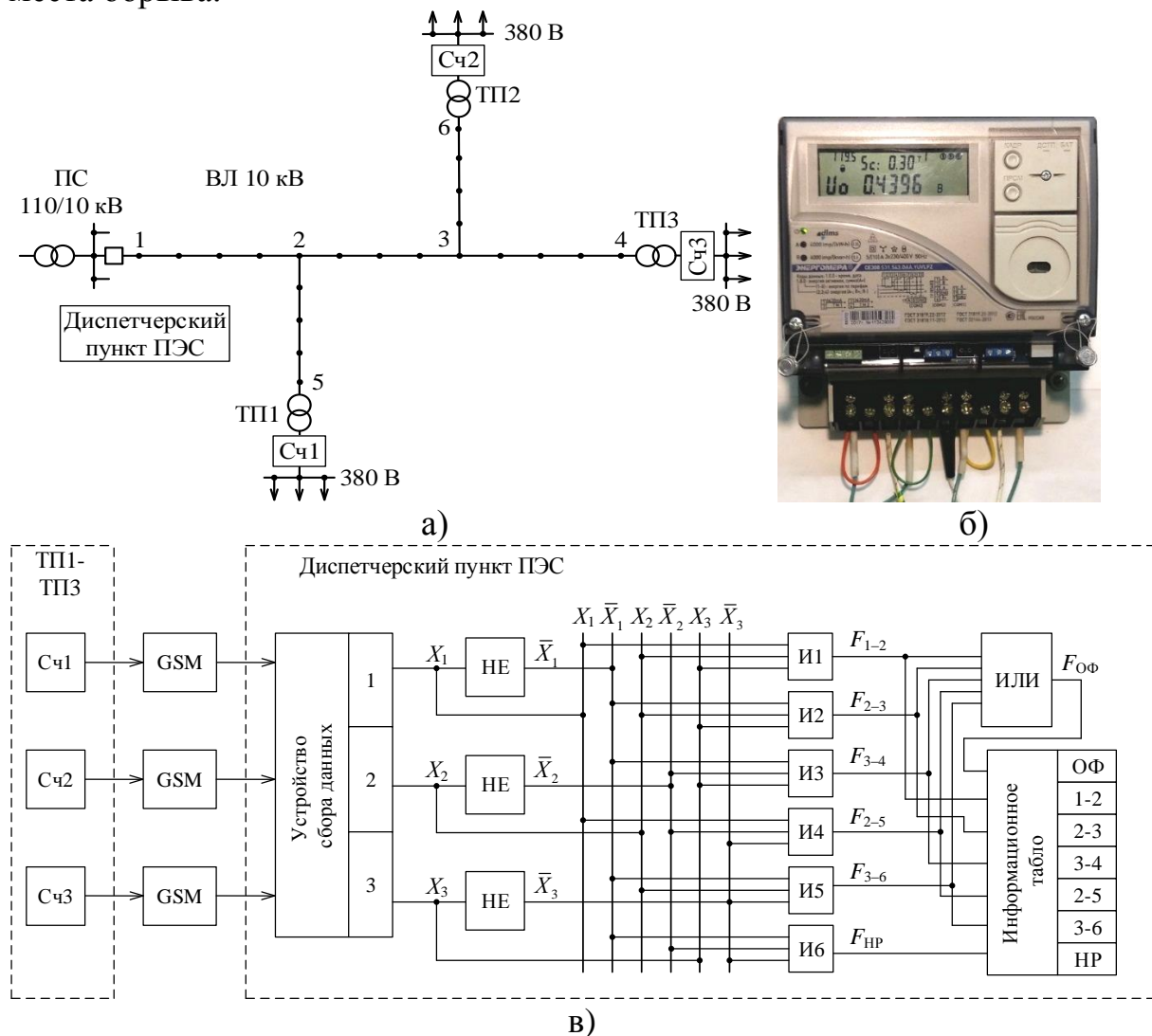


Рисунок 7 – Электрическая сеть с системой автоматического определения участка ВЛ-10 кВ с обрывом (а), микропроцессорный счётчик электроэнергии типа CE308-S31 (б), функциональная схема системы (в)

Проведён анализ длительности технологического нарушения при обрыве фазного провода для трёх вариантов: обрыв фазного провода с ОЗЗ, обрыв фазного провода без ОЗЗ и обрыв провода с применением системы автоматического определения повреждённого участка ВЛ. На рисунке 8 представлен алгоритм отыскания повреждения и его устранения для трёх перечисленных случаев.

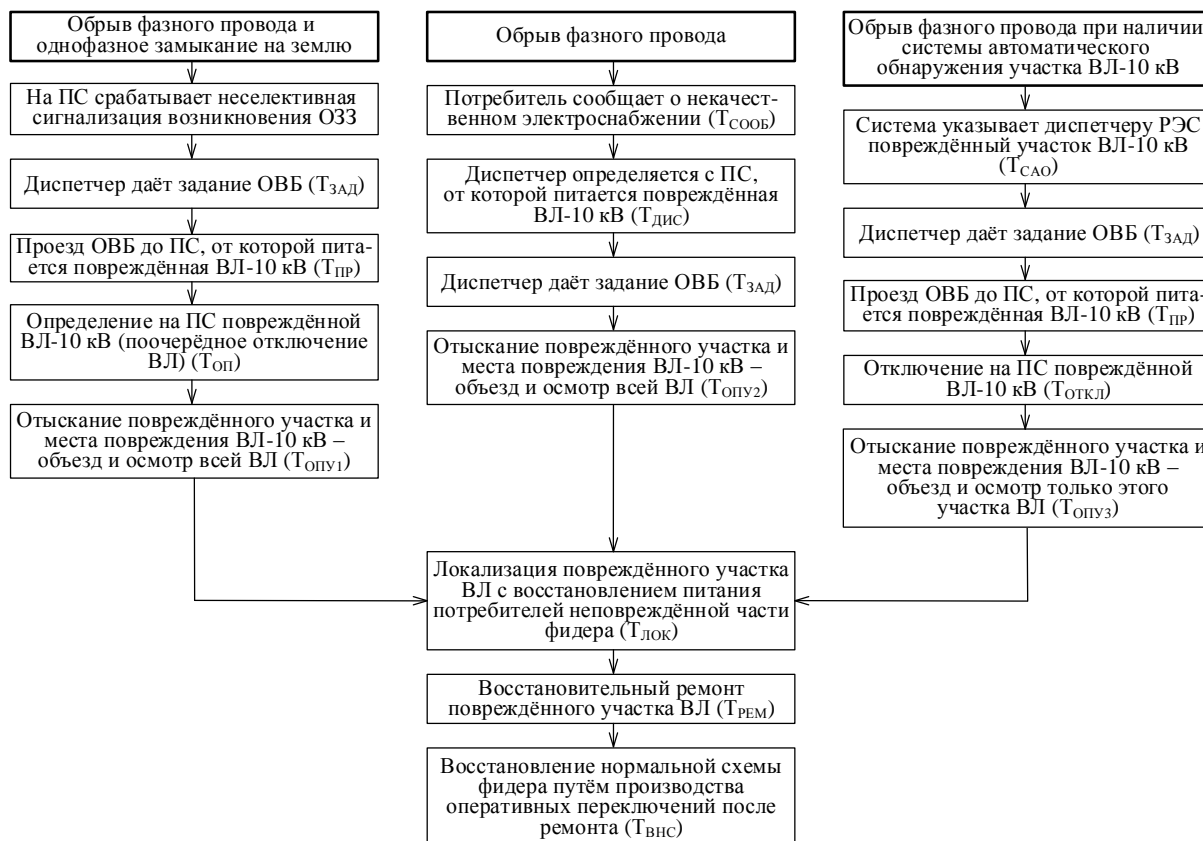


Рисунок 8 – Алгоритм отыскания повреждения и его устранения

Анализ изменения длительности технологических нарушений и их составляющих показал, что применение системы автоматического определения повреждённого участка ВЛ при указанных повреждениях позволит сократить длительность существования электроопасной ситуации в среднем в 4 раза, что уменьшит опасность поражения электрическим током.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложено новое решение актуальной научно-технической задачи, состоящее в обеспечении безопасности при эксплуатации воздушных линий напряжением 6–10 кВ посредством применения разработанного устройства защиты ВЛ при обрыве фазного провода в указанных линиях.

Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы по работе.

1 Проведён анализ технических характеристик ВЛ 6–10 кВ и технологических нарушений в сетях филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челяб-энерго»:

– воздушные линии выполнены в основном алюминиевыми и сталеалюминиевыми голыми проводами, лишь 5,1 % линий выполнены самонесущим изолированным проводом (СИП);

– длины воздушных линий вместе с отпайками достигают 44 км, а длины магистральных участков – 24 км;

– на 100 км линий приходится в среднем в год 0,702 обрыва фазных проводов;

– выявлено, что 81 % обрывов приходится на провода ВЛ 6–10 кВ 1970–1980-х годов изготовления и ранее. При этом 50 % оборванных проводов находилось в эксплуатации больше нормативного срока, вплоть до 77 лет.

2 С целью разработки устройства защиты и определения его структуры и параметров проведены исследования изменений напряжений, возникающих в электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ при обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ, на компьютерной модели. Результаты этих исследований подтверждены экспериментами на физической модели, а также в опытной электрической сети напряжением 10/0,38 кВ.

3 Установлены закономерности в изменениях симметричных составляющих напряжений при различных режимах работы электрической сети 6–10/0,38 кВ, определено место установки устройства защиты – сторона низшего напряжения понижающего трансформатора 6–10/0,4 кВ, выбрано в качестве информационного параметра для выявления обрыва провода ВЛ 6–10 кВ напряжение обратной последовательности.

4 Исследования семнадцати режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ позволили определить зону возможных уставок по напряжению обратной последовательности устройства защиты, находящуюся в диапазоне 0,05–0,17 о. е., и конкретную величину уставки, равную $U_{2,УСТ} = 0,1$ о. е.

5 Разработано устройство защиты на основе серийно выпускаемого микропроцессорного счётчика электроэнергии типа СЕ308-S31, программно-доработанного и изготовленного Корпоративным институтом электротехнического приборостроения АО «Электротехнические заводы “Энергомера”», и проведены его испытания на физической модели, которые показали его функциональные возможности, позволяющие идентифицировать обрыв фазного провода ВЛ 6–10 кВ.

6 Разработана система, позволяющая автоматически определять участок ВЛ 6–10 кВ, на котором произошёл обрыв фазного провода, содержащая микропроцессорные счётчики электрической энергии с функцией определения обрыва фазного провода, устанавливаемые на стороне низшего

напряжения трансформаторных подстанций, GSM-каналы передачи информации на диспетчерский пункт РЭС, устройство сбора данных, логический блок и информационное табло.

7 Применение разработанной системы автоматического определения участка ВЛ с обрывом фазного провода позволит уменьшить время поиска места обрыва ВЛ, время нахождения повреждённого участка под напряжением и, следовательно, длительность существования электроопасной ситуации, что позволит улучшить условия труда персонала оперативно-выездных бригад и уменьшить опасность поражения электрическим током людей и животных.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в периодических научных изданиях, включённых в перечень ВАК Минобрнауки РФ

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

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

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

Статьи в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

4 Ershov, A.M. The results of power grid research modes in case of 6–10 kV overhead lines phase wire breakage [Text] / A.M. Ershov, A.V. Khloпова, A.I. Sidorov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Saint Petersburg, 2017, Paper 8076280.

5 Ershov, A.M. Phase Wire Break Signaling for 6 – 10 kV Overhead Line [Text] / A.M. Ershov, A.V. Khloпова, A.I. Sidorov // Power Technology and Engineering, Vol. 52, No. 1, 2018, pp. 110-115.

6 Ershov, A.M. Extension of Functions of Microprocessor-based Electric Energy Meters to Detect 10 kV Overhead Line Phase Wire Breakage [Text] / A.M. Ershov, A.V. Khloпова, A.I. Sidorov // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 2018, Paper 8570095.

Другие научные публикации

7 Хлопова, А.В. Исследование режимных параметров при обрывах воздушных линий напряжением 6–10 кВ [Текст] / А.В. Хлопова // Электро-

энергетика глазами молодёжи: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19–23 сентября 2016 г., Казань. – В 3 т. Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 242–245.

8 Тропин, С.А. Использование микропроцессорных счётчиков в качестве элемента защиты при обрывах фазных проводов воздушной линии напряжением 6–10 кВ [Текст] / С.А. Тропин, А.В. Хлопова // Безопасность и управление рисками: материалы III Международной научно-практической конференции (9–11 ноября 2016 г.). – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 165–171.

9 Хлопова, А.В. Результаты исследований обрывов проводов воздушных линий напряжением 6–10 кВ на компьютерной модели [Текст] / А.В. Хлопова // Безопасность жизнедеятельности глазами молодёжи: сборник материалов IV Всероссийской студенческой конференции (с международным участием); под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2017. – С. 130–134.

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

11 Хлопова, А.В. Техническое состояние и повреждаемость воздушных линий 6–10 кВ [Текст] / А.В. Хлопова // Безопасность жизнедеятельности глазами молодёжи: сборник материалов V Всероссийской студенческой конференции (с международным участием): в 2 т.; под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2019. – Т.1. – С. 226–229.

Патенты и свидетельства

12 Устройство защиты от обрывов проводов воздушной линии электропередачи с изолированной нейтралью [Текст]: пат. 2633803 Рос. Федерация: МПК Н 02 Н 5/10 / Ершов А.М., Филатов О.В., Хлопова А.В., Запорожский А.В., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. – № 2017102432; заявл. 25.01.2017; опубл. 19.10.2017, Бюл. № 29. – 6 с.

Личный вклад автора. Все разработки и научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Статьи [2, 7, 9, 11] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1, 3–5, 10] – проведены исследования изменений напряжений в электрической сети 6–10/0,38 кВ, обоснован выбор информационного параметра, [6, 8] – показана возможность использования микропроцессорного счётчика электроэнергии в качестве устройства защиты, участие в испытании устройства, [12] – разработан алгоритм построения устройства защиты.

Хлопова Анна Владимировна

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать __.__.2019. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.