

На правах рукописи



Квришвили Любовь Витальевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛОКАЦИИ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
СЕТЯХ**

Специальности:

05.14.12 – Техника высоких напряжений

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Качесов Владимир Егорович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Манусов Вадим Зиновьевич**, доктор технических наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий

Вайнштейн Роберт Александрович, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры электроэнергетических систем

Ведущая организация: Филиал ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ (Сибирский научно-исследовательский институт энергетики)

Защита состоится: «19» декабря 2012 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г.Томск, ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан «15» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Распределительные сети 6-35 кВ (РС) являются наиболее протяженными среди сетей 0,4-110 кВ и занимают значительную часть в инфраструктуре передачи и распределения электроэнергии. Однако их эксплуатация сопряжена со значительными издержками, обусловленными аварийными перебоями в энергоснабжении и необходимостью проведения профилактических и ремонтных работ.

Изоляция линий электропередачи данного класса напряжения, подверженная электрическим перегрузкам, постепенно деградирует со временем, в связи с этим в ней образуются места с пониженной электрической прочностью. В этих местах как при электрических возмущениях в сети, так и при нормальном эксплуатационном режиме могут возникать замыкания на землю, немалая доля которых носит дуговой характер – однофазные дуговые замыкания (ОДЗ).

В большинстве случаев ОДЗ происходит самогашение заземляющей дуги, приводящее к возникновению в зоне горения отрицательных последствий – ослабленных мест, которые с течением времени могут вызвать повторный пробой и более серьезный вид повреждения (например, переход повторного ОДЗ в междуфазное короткое замыкание, в случае которого происходит автоматическое отключения фидера и потребителя).

Большой процент самоустраняющихся ОДЗ ставит *задачи распознавания повреждения* среди всего потока аварийных событий и *локации его местоположения*, поскольку изоляция в месте замыкания ослаблена и требует проведения профилактических испытаний для оценки ее остаточной электрической прочности или выполнения, при необходимости, ремонтно-восстановительных работ.

Особое внимание задаче локации должно уделяться на производствах с непрерывным циклом, где возможно возникновение катастрофического ущерба в виде массового брака продукции и повреждения дорогостоящего технологического оборудования. В таких отраслях промышленности (например, объекты добычи и транспорта нефти и газа) перерывы в энергоснабжении должны быть кратковременными и подлежать устранению в кратчайшие сроки.

Значительный вклад в развитие отечественных методов локации однофазных повреждений в разные годы внесли Кофман Б.Л., Манн А.К., Платонов В.В., Половников В.А., Спиридонов В.К., Шалыт Г.М., Щедрин М.Б. (для кабельных линий), а также Айзенфельд А.И., Баранаскас Л.П., Беляков Ю.С., Борозинец Б.В., Борухман В.А., Розенкноп М.П., и др. (применительно к воздушным линиям). Однако методы локации, существующие в настоящее время, являются малопригодными для определения мест кратковременных самоустраняющихся замыканий, а *локационные и волновые методы*, широко используемые во всем мире в сетях высокого и сверхвысокого напряжений (с эффективно заземленной нейтралью), практически не пригодны для определения мест повреждений в радиальных РС под рабочим напряжением. Указанная проблема интенсивно решается в европейских странах (Франция, Германия, Бельгия, Финляндия и т.д.).

В рамках настоящего исследования ставится задача повышения надежности и эффективности энергоснабжения сетей среднего класса напряжения за счет

сокращения количества однофазных повреждений и их длительности, что осуществляется на основании *on-line мониторинга электрической сети, оперативной диагностики* ее состояния и выполнения своевременной и целенаправленной профилактики изоляции.

Целью работы является разработка и совершенствование методов определения зоны однофазных повреждений на землю в РС, позволяющих производить своевременную диагностику и ремонт фазной изоляции и, тем самым, минимизировать издержки электросетевых эксплуатирующих организаций.

Для достижения цели исследования поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ существующих методов локации однофазных повреждений в сетях среднего класса напряжений и проведена оценка их эффективности.

2. Определены структурные части задачи *on-line* диагностики РС 6-35 кВ.

3. В рамках решения задачи диагностики состояния РС разработаны методы распознавания однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6-35 кВ, эксплуатируемых в режиме изолированной и резонансно-заземленной нейтрали.

4. Усовершенствованы параметрические методы локации ОЗЗ – частотно-параметрический и дифференциально-параметрический.

5. Исследованы влияния топологии электрической сети и нагрузки на точность локации при использовании параметрических методов.

6. Исследованы и определены области применения параметрических методов в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания.

7. Разработан формализованный метод локации ОЗЗ, основанный на использовании математического аппарата искусственных нейронных сетей.

8. Для апробации формализованного метода локации разработана модель воздушной линии электропередачи с частотно-зависимыми параметрами, позволяющая проводить численный эксперимент ОЗЗ с минимальными погрешностями моделирования.

Методы исследования. В работе использованы методы обработки экспериментальных данных, полученных в результате активного и пассивного эксперимента в действующих электрических сетях; методы математического моделирования переходных процессов, основанные на теории электрических цепей; методы теории вероятности; численные методы, а также математический аппарат искусственных нейронных сетей.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Метод распознавания ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью, основанный на малой скорости изменения напряжения нулевой последовательности после самогашения заземляющей дуги, позволяющий достоверно выделять ОЗЗ среди всего потока аварийных событий.

2. Метод распознавания ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью, содержащих протяженные воздушные линии электропередачи, основанный на анализе предаварийных напряжений и переходных напряжений в момент замыкания на землю.

3. Методика эквивалентирования разветвленной распределительной сети, позволяющая учитывать изменения топологии сети и нагрузки для получения амплитудно-частотных и дифференциальных характеристик, несущих информацию о месте замыкания, в темпе процесса измерений.

4. Новый формализованный метод локации ОЗЗ в сетях 6-35 кВ, основанный на использовании математического аппарата искусственных нейронных сетей, позволяющий достоверно определять место повреждения по образам кривых переходных процессов в момент замыкания на землю.

5. Способ определения высокоомных замыканий на землю, локация которых параметрическими и формализованными методами потенциально не возможна (или выполняется с высокой погрешностью), основанный на анализе значения максимального напряжения на нейтрали сети после гашения заземляющей дуги.

Научная новизна работы:

1. Впервые показано, что достоверное распознавание ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью может быть выполнено путем определения скорости изменения напряжения нулевой последовательности после самогашения заземляющей дуги; определена оптимальная длительность временного интервала обработки напряжения на нейтрали сети, обеспечивающая достоверное распознавание.

2. Впервые предложен метод распознавания первичного замыкания на землю для сетей с изолированной нейтралью, содержащих протяженные воздушные линии электропередачи, основанный на анализе переходных напряжений и их производных и предаварийных значений напряжений в момент замыкания на землю.

3. Для параметрических методов выполнен анализ влияния параметров, изменяющих частоту собственных колебаний сети и определяющих точность локации: топологии и емкости сети, нагрузки.

4. Впервые предложена методика эквивалентирования сложных радиальных схем, позволяющая оперативно учитывать изменения топологии сети и нагрузки для получения амплитудно-частотных или дифференциальных характеристик сети, несущих информацию о месте замыкания, в рамках применения разработанных параметрических методов локации ОЗЗ.

5. Разработан метод выделения высокоомных замыканий на землю, локация которых параметрическими и формализованными методами потенциально невозможна, основанный на анализе величины максимального напряжения на нейтрали после гашения заземляющей дуги.

6. Разработан формализованный метод локации ОЗЗ в РС, позволяющий распознавать и классифицировать образ переходного процесса при ОЗЗ при помощи математического аппарата искусственных нейронных сетей.

7. Предложен итерационный подход к задаче распознавания образов переходных процессов, позволяющий упростить алгоритм локации и снизить погрешность.

8. Для программного комплекса PSpice разработана модель воздушной линии электропередачи, учитывающая частотные зависимости первичных и волновых параметров линий в контуре нулевой последовательности, позволяющая получать достоверные образы переходных процессов, используемые для локации.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

- Разработанные методы локации ОЗЗ (в т.ч. формализованный метод) позволяют эффективно определять зоны однофазных повреждений в РС в on-line режиме и оперативно управлять сетью для минимизации негативного влияния дуговых перенапряжений на оборудование всей сети.

- На основе данных локации и топологии РС строится карта аварийности, используемая для оптимизации профилактических испытаний и ремонтно-восстановительных работ.

- Методы эквивалентирования РС позволяют реализовать разработанные методы локации на микрокомпьютерах низкой производительности и на микроконтроллерах.

- Для кабельных сетей с емкостными токами замыканий на землю (ЕТЗЗ) 30-100А определено значение переходного сопротивления канала дугового замыкания ($R_d \approx 4 \div 6 \text{ Ом}$), которое может быть использовано при численном моделировании для целей локации ОЗЗ.

- На основании обработки результатов мониторинга в кабельных РС определены оптимальные значения признака замыкания ($K=3$) и время интегрирования фазных напряжений ($t_{\text{и}}=3$ мс) в методе распознавания ОЗЗ в сетях с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (ДГР).

- Методы распознавания ОЗЗ использованы во внедренном аппаратно-программном комплексе on-line диагностики РС 10 кВ в ОАО ГУП «УЭВ СО РАН» (г. Новосибирск).

- Параметрические методы локации использованы при разработке измерительного комплекса для определения мест однофазных замыканий на землю на ВЛ электрохимической защиты 10 кВ в ОАО «Сибэнергосервис» (г.Новосибирск).

Достоверность результатов работы. Сформулированные в диссертации результаты и выводы основываются на апробированных программах моделирования стационарных и переходных режимов электрических цепей и систем (PSPICE, MATLAB). Обоснованность результатов, полученных моделированием, подтверждается их хорошим согласием с результатами проверочных аналитических расчетов, выполненных с использованием основных законов электротехники, и данными мониторинга и активного эксперимента в действующих электрических сетях 10 кВ.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, посвященных дням науки НГТУ (2004-2006 гг.); на Всероссийских научно-технических семинарах и конференциях: «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г.Томск, ТПУ, 2004, 2005, 2006 гг.); «Наука. Технологии. Инновации», НТИ-2004, НТИ-2007 (г.Новосибирск, НГТУ); «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали 3-6-10-35 кВ» (НГТУ, Новосибирск, 2004, 2006, 2008 гг.); «Электроэнергетика глазами молодёжи» (г.Самара, 2011); на III молодежной Международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2008); на международных научно-технических конференциях: «IEEE PowerTech'05» (St.-Petersburg, 2005); «The 7th International Scientific Conference on Electric Power Engineering» (University of Brno, 2006).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, из них: 4 публикации, входящие в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, включая 1 патент РФ на изобретение; 10 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских конференций и семинаров, 1 статья в сборнике научных трудов.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка математических моделей и методов, реализация и тестирование алгоритмов в программно-вычислительных комплексах, анализ и обобщение результатов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, включающего 89 наименований, и приложений. Основной объём работы составляет 168 страниц, включая 13 таблиц и 68 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика диссертационной работы, показана ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы, связанная с необходимостью разработки и совершенствования методов локации ОЗЗ, позволяющих эффективно определять зоны однофазных повреждений в РС в on-line режиме и оперативно управлять сетью для минимизации негативного влияния дуговых перенапряжений на оборудование всей сети.

В первой главе сформулирован основной подход к задаче локации ОЗЗ в РС и определены составляющие части on-line диагностики состояния сети: распознавание однофазного замыкания на землю, выделение поврежденного фидера и локация места повреждения фазной изоляции.

В рамках решения первой подзадачи диагностики выполнен обзор существующих методов распознавания ОЗЗ применительно к сетям среднего класса напряжения с изолированной или неэффективно-заземленной нейтралью. Дан критический анализ используемых в настоящее время методов и средств распознавания однофазных замыканий на землю и показано, что для случаев кратковременного (составляющего единицы миллисекунд) единичного пробоя фазной изоляции указанные методы являются малоприменимыми, поскольку большей частью основаны на измерении параметров установившегося режима замыкания.

Основной акцент в главе сделан на усовершенствование и разработку методов распознавания ОЗЗ в РС с различными режимами заземления нейтрали.

Распознавание ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью (ИН). Сети с ИН характеризуются малой скоростью изменения напряжения нулевой последовательности (НП) на нейтрали после гашения заземляющей дуги. Снижение напряжения на нейтрали происходит, в основном, за счет насыщения магнитопроводов измерительных трансформаторов напряжения.

Метод распознавания ОЗЗ в сетях с ИН в качестве основного признака замыкания использует модуль скорости изменения напряжения на нейтрали между пробоями фазной изоляции $|du_N / dt|$.

Фазные напряжения $u_\gamma(t)$, $\gamma=\{A,B,C\}$, регистрируемые на шинах питающей подстанции, сравниваются с пороговым уровнем ($\sim 2U_{ф.м}$, где $U_{ф.м}$ – максимальное фазное напряжение). В случае превышения уровня любым фазным напряжением определяются все производные фазных напряжений и сопоставляются их знаки.

При совпадении всех знаков производных напряжений и превышения их модулями уставки U'_y переходят к анализу характера напряжения на нейтрали. Уставка принимается равной удвоенному значению производной наибольшего рабочего линейного напряжения сети:

$$U'_y \approx 2 \max(\sqrt{3}U_{ф.м(нр)})\omega \sin(\omega t) = 2\omega\sqrt{3}U_{ф.м(нр)}, \quad (1)$$

где ω – промышленная угловая частота.

На пологом участке напряжения НП длительностью $t_{п}$ ($t_{п} \in [t_1; t_2]$, где $t_1 = t_0 + t_y$, $t_2 = t_1 + t_{п}$, t_0 – время превышения модуля последней производной уставки U'_y , t_y – время успокоения, за которое колебания в контуре прямой последовательности затухают) выполняется его квадратичная аппроксимация (рис.1). Аппроксимирующий полином записывается в соответствии с выражением

$$u_N(t)|_{t \in [t_1; t_2]} \approx \tilde{u}_N(\tau)|_{\tau \in [0; t_{п}]} = a\tau^2 + b\tau + c. \quad (2)$$

Если модуль производной напряжения на нейтрали сети меньше $0,1U_{ф.м}/мс$ (т.е. $|b| < 0,1U_{ф.м}/мс$) и модуль начального напряжения превышает $0,1U_{ф.м}$ ($|c| > 0,1U_{ф.м}$), то устанавливается факт ОЗЗ.

Выполненные исследования позволили определить оптимальную длительность измерительного интервала, которая составила 3 мс, значения

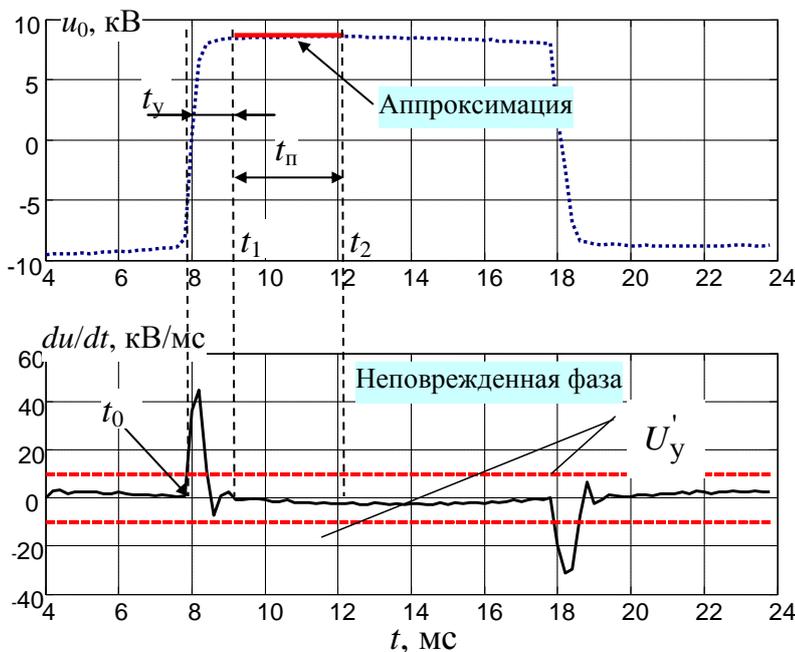


Рисунок 1 – Напряжение нулевой последовательности и производная напряжения на неповрежденной фазе

уставок по производной напряжения, а также по мгновенному значению напряжения u_{N0} в начале участка аппроксимации.

Анализ напряжения НП, полученного в результате мониторинга действующей кабельной сети 10 кВ, подтвердил работоспособность разработанного метода (условия распознавания ОЗЗ выполняются при всех замыканиях, т.е. модуль напряжения на нейтрали после погасания заземляющей дуги больше $0,1U_{ф.м}$ и его производная по модулю меньше $0,1U_{ф.м}/мс$).

Распознавание ОЗЗ в сетях с ИН, содержащих протяженные воздушные линии электропередачи (ВЛ). Характер напряжения на нейтрали в сетях с

протяженными ВЛ (например, РС, питающие объекты нефтедобывающей промышленности) определяется относительно малым временем горения заземляющей дуги, в течение которого заряд на поврежденной фазе не успевает полностью рассеяться. В этой связи длительность горизонтальной полки на напряжении НП крайне мала и метод распознавания ОЗЗ по признаку неизменности напряжения на нейтрали не применим.

Для решения задачи распознавания ОЗЗ в РС, содержащих протяженные ВЛ, разработан метод, который заключается в регистрации фазных напряжений на шинах питающей подстанции и их последующей обработке и анализе:

1. В случае превышения любым из фазных напряжений значения уставки по уровню перенапряжения ($\sim 2U_{ф.м}$) фиксируется момент времени – $t_{пн}$.

2. Выполняется возврат к некоторому моменту времени t_0 , который определяется как: $t_0 = t_{пн} - T_{1макс}/2$ (где $T_{1макс}$ – период свободных колебаний при самом удаленном от шин питающей подстанции замыкании).

3. На интервале времени $[t_0; t_{пн}]$ определяются производные фазных напряжений и сопоставляются их знаки. Если для указанного интервала в какой-то момент времени производные всех фазных напряжений, взятые по модулю, превышают некоторую уставку (U'_y , см. (1)) и знаки этих производных совпадают, то фиксируется данное время – $t_{ОДЗ}$.

4. Производится анализ абсолютных значений фазных напряжений при $t = t_{ОДЗ}$. В случае, если на той фазе, где было зафиксировано превышение уставки по уровню перенапряжений, значение напряжения находится в диапазоне от $(0,4..0,6)U_{ф.м}$, а на двух других фазах напряжения находятся в диапазонах $(0,9..1,2)U_{ф.м}$ на одной, и $(0,4..0,6)U_{ф.м}$ на другой, то устанавливается факт *первичного* однофазного замыкания на землю в электрической сети.

Распознавание ОЗЗ в сетях с резонансно-заземленной нейтралью. В основе метода распознавания ОЗЗ в сетях с компенсацией ЕТЗЗ лежит свойство медленного восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания заземляющей дуги.

В случае совпадения знаков всех производных фазных напряжений, регистрируемых на шинах питающей подстанции, их значения сравниваются с некоторой уставкой U'_y .

Действующие значения фазных напряжений, получаемые интегрированием на малом временном интервале (t_n), начало которого определяется моментом достижения последней производной фазного напряжения значения уставки, ранжируют по возрастанию следующим образом: $U_{п} = U_{мин} < U_{ср} < U_{макс}$ (индекс «п» соответствует поврежденной фазе).

Если выполняется условие: $U_{ср}/U_{мин} > K$, где K – признак замыкания, зависящий от коэффициента компенсации ЕТЗЗ (рис. 2), то событие считается однофазным замыканием на землю, которое при его единичном появлении может быть как дуговым, так и металлическим.

Величина признака замыкания K является определяющей при формировании вывода о факте возникновения ОДЗ. Параметр K может варьироваться в широком диапазоне, т.к. зависит от характера горения заземляющей дуги, который является

случайным процессом и определяется видом дефекта изоляции и сочетанием параметров самой электрической сети.

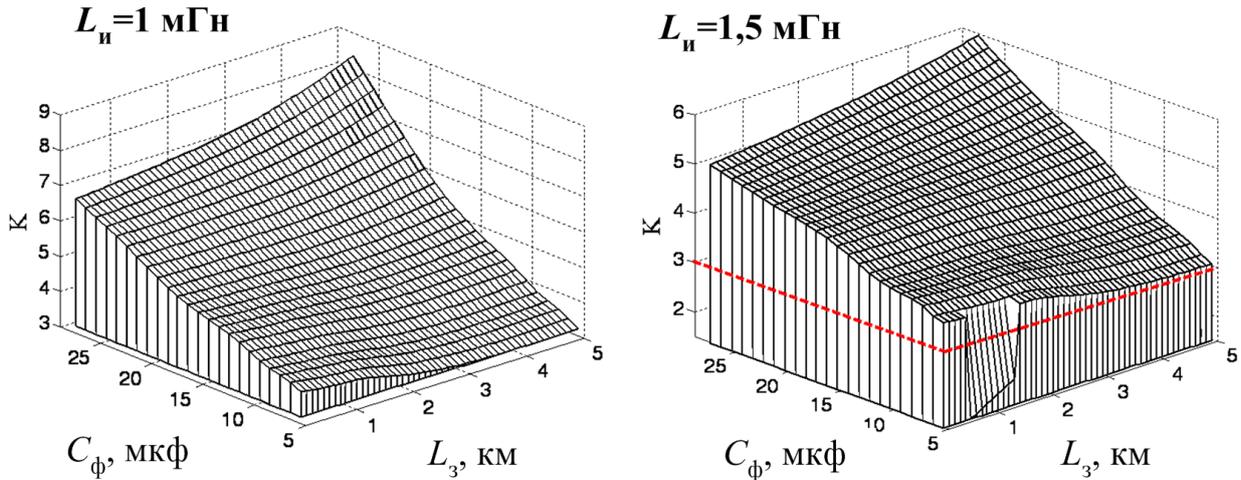


Рисунок 2 – Признак замыкания K в сетях с различными параметрами ($K_L=1$, $t_{и}=3$ мс, $R_d=4$ Ом)

Приближенная оценка K при условиях: $\varphi=\pi/2$, $\pi/\beta_1 \ll \varphi$, $A_2=0$, $\beta_0=\omega$ ($K_L=1$) (β_1 – угловая частота свободных колебаний в момент горения дуги, A_2 – амплитуда свободных колебаний на поврежденной фазе после погасания дуги) рассчитывается по выражению

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\sqrt{1+2K_0+3K_0^2+2K_0^3+K_0^4} \sin(2\omega t_{и} + \phi) + 4\omega t_{и} (1+K_0+K_0^2) - \sqrt{3}(1+2K_0)}{(\frac{1}{2} \sin(2\omega t_{и}) + 4\omega t_{и})(K_0-1)^2}}, \quad (3)$$

где $\phi = \arctg\left(\frac{\sqrt{3}(1+2K_0)}{2K_0^2+2K_0-1}\right)$, $K_0 = U_{N0}/U_{ф.м.}$

Интегральная оценка признака замыкания выполнена для широкой вариации параметров сети. Минимальное значение признака для эквивалентной индуктивности источника $L_{и}=1 \dots 1,5$ мГн равно $K_{\min} \approx 3,2$ (рис. 2), для $L_{и}=0,5$ мГн – $K_{\min}=3,6$. Существует небольшая зона параметров (рис.2), где величина признака $K < 3$. Маловероятное нераспознавание возможно в сетях с маломощным источником питания ($L_{и}=1,5$ мГн) и малым ЕТЗЗ в случаях, когда гашение дуги происходит при нуле разрядной составляющей тока замыкания.

Выполнены исследования, позволившие определить минимальное значение признака замыкания, при котором факт ОЗЗ можно считать достаточно надежным. Сопоставление значений этого параметра выполнено для другого частого возмущения в сети – включения линий (цепочки линий).

На основании теоретических исследований и статистической обработки данных мониторинга в действующих распределительных сетях (при коэффициенте компенсации ЕТЗЗ 0,8..1,2) рекомендовано значение признака замыкания $K \approx 3$ (рис.3).

Вторая подзадача on-line диагностики состояния сети (*выделение поврежденного фидера*) решается при помощи метода, основанного на принципе противоположности полярностей первой полуволны переходного тока НП (i_0) в

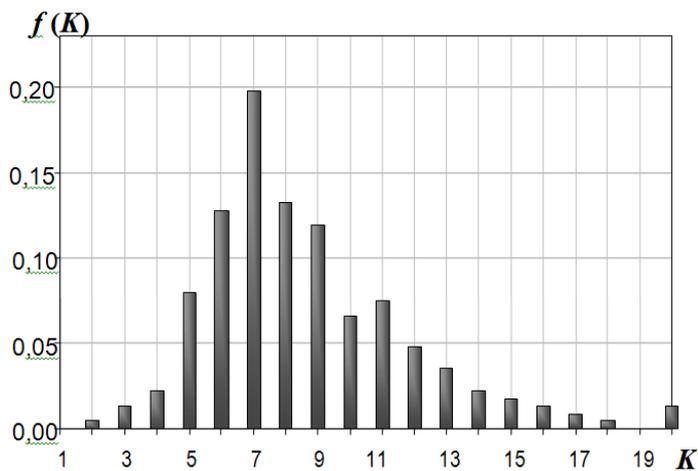


Рисунок 3 – Гистограмма плотности распределения признака замыкания K для распределительной кабельной сети 10 кВ

поврежденном и неповрежденном фидерах, после установления факта ОЗЗ в электрической сети при помощи описанных методов распознавания.

Во второй главе изложено описание параметрических методов локации ОЗЗ в распределительных сетях под рабочим напряжением и приведены особенности их применения в зависимости от текущего состояния сети (топологии и нагрузки) и специфики горения заземляющей

дуги (вида замыкания).

Частотно-параметрический метод локации основан на анализе частоты свободных колебаний сети (f_2) в переходном процессе замыкания на землю, обусловленной разрядом фазной емкости сети. Частотные характеристики сети (рис.4,а) получают при помощи комплексов программ моделирования электромагнитных переходных (стационарных) процессов.

На основании частотных характеристик (рис.4,б) формируется зависимость расстояния до места повреждения (l_3) от частоты свободных колебаний f_2 . Выделение частоты f_2 из аварийных осциллограмм в режиме однофазного дугового замыкания осуществляется при помощи прямого дискретного преобразования Фурье.

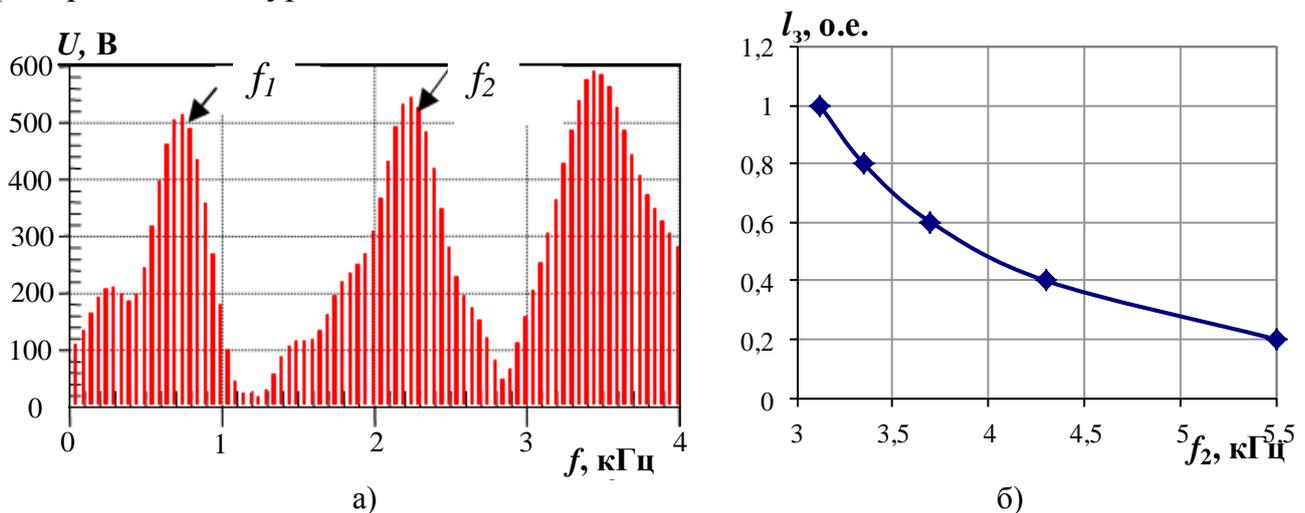


Рисунок 4 – Частотный спектр напряжения на поврежденной фазе (а); частотные характеристики при изменении места замыкания (б)

Данный метод локации ориентирован, главным образом, на определение зоны замыкания в тех случаях, когда горение заземляющей дуги достаточно продолжительно и выделение частоты свободных колебаний не затруднено.

Для локации кратковременных замыканий на землю, что является особенно важным для решения задачи оперативной диагностики, рекомендуется к

применению *дифференциально-параметрический метод*, в котором параметром, несущим информацию о месте замыкания, является значение производной напряжения на поврежденной фазе в начальный момент замыкания (рис. 5), определяемое следующим образом:

1. Напряжение на поврежденной фазе аппроксимируется квадратичным полиномом:

$$\hat{u}(t) = a_0 t^2 + a_1 t + a_2; \quad (4)$$

2. Вычисляется максимальное значение производной напряжения на начальном участке аппроксимации ($t \in [t_0, t_1]$):

$$\left(\frac{d\hat{u}}{dt}\right)_{\max} = |2a_0 \min_{t \in [t_0, t_1]} (t) + a_1| = |2a_0 t_0 + a_1|; \quad (5)$$

3. Максимальная производная напряжения нормируется по отношению к напряжению пробоя:

$$\left(\frac{d\hat{u}^*}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{d\hat{u}}{dt}\right)_{\max} \frac{1}{U_{\text{п}}}. \quad (6)$$

4. Определяется расстояние до места замыкания по предварительно полученным расчетным зависимостям $l_{3,k} = \phi_k(\hat{d}\hat{u}^*/dt)$ (где k – номер цепи линий от пункта питания до конечной точки ветви).

Недостатком дифференциально-параметрического метода является сложность определения начальной части переходного процесса, что может приводить к увеличению погрешности локации при малых l_3 .

Особенностью всех параметрических методов локации (также и формализованных) является зависимость результатов

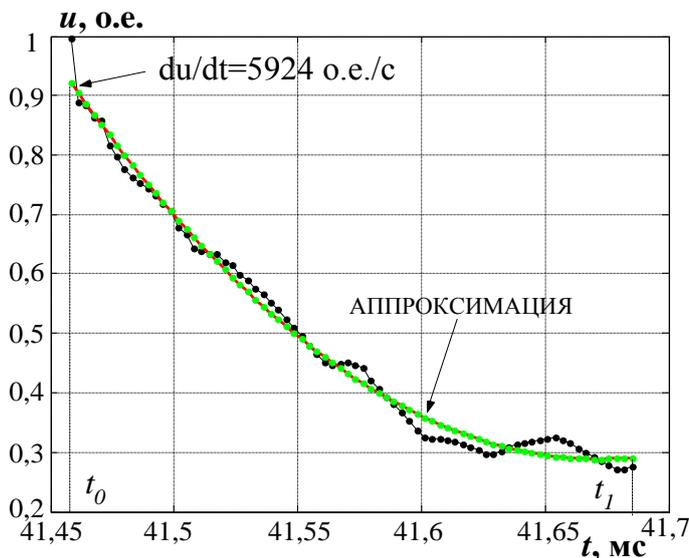


Рисунок 5 – Напряжение на поврежденной фазе и его аппроксимация квадратичным полиномом

измерений от состояния электрической сети. Учет изменения топологии и нагрузки сети может быть реализован двумя подходами:

- Заблаговременный расчет амплитудно-частотных или дифференциальных характеристик присоединений ($l_{3,k} = \phi_k(\hat{d}\hat{u}^*/dt)$, $l_{3,k} = \phi_k(f_2)$) в режиме ОЗЗ для всех наиболее вероятных режимов с последующей интерполяцией значений в промежуточных точках (т.е. формирование исходной базы данных – БД). Проведенные расчеты показали, что также возможна корректировка имеющихся характеристик сети: незначительное изменение емкостных параметров сети и нагрузки (5-10%) при измерении расстояния до места замыкания в РС может корректироваться с помощью поправочных коэффициентов, более значительные изменения – с помощью полиномов низкого порядка.

- Расчет характеристик, несущих информацию о месте замыкания, в темпе процесса измерений (на основе оперативно поступающей информации), т.е. обновление и расширение БД в режиме реального времени.

Второй подход обеспечивает более высокую точность локации, однако сложность полной электрической схемы питания, содержащей, как правило, сотни узлов, ограничивает его применение. В том случае, когда использование сложных пакетов программ моделирования стационарных и переходных процессов для получения характеристик полной схемы сети по ряду причин невозможно, может быть применена *методика редуцирования порядка расчетной схемы* без заметной потери точности расчетов в эквивалентной схеме.

Методика редуцирования схемы сети состоит в поэтапном эквивалентировании различных ее участков с целью приведения сложной древовидной схемы РС, имеющей очень высокий порядок системы дифференциальных уравнений, описывающей переходные процессы в ней, к некоторой эквивалентной электрической схеме низкого порядка.

Эквивалентирование однородных линий (с постоянными удельными первичными параметрами по всей длине). В случае, когда в структуре электрической сети содержится значительное число распределительных подстанций (РП) с большим количеством присоединений, схема может быть упрощена до схемы цепочного вида и далее приведена к П-схеме при помощи правила моментов (рис. 6).

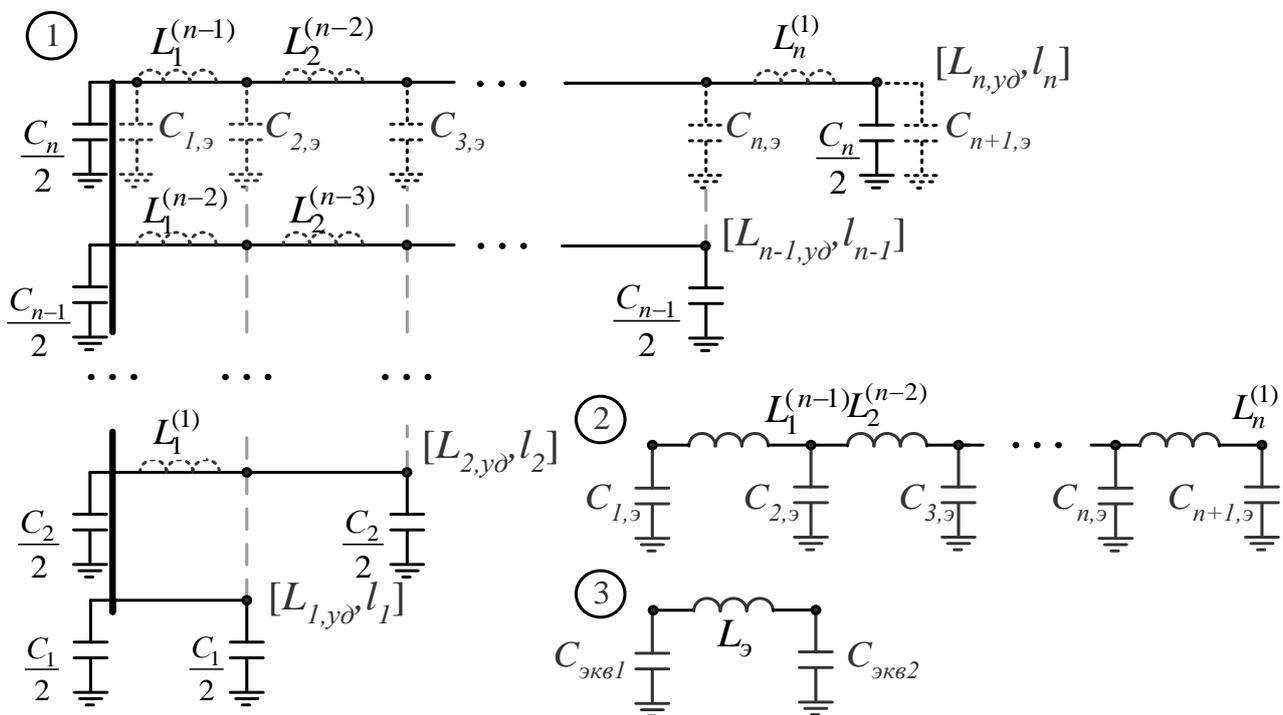


Рисунок 6 – Преобразование расчетной схемы для случая однородной сети

Для преобразования полной схемы к схеме цепочного вида отходящие фидера ранжируются по своей протяженности, в месте проекции окончания предыдущего фидера на следующий формируется «фиктивный» узел (считается, что все фидеры включены параллельно) и затем происходит поэтапное эквивалентирование параметров (индуктивностей и емкостей) отходящих присоединений согласно следующим выражениям:

$$L_k^i (k=1..(n-1); i=1..(n-k)) = \frac{L_k^{i-1} L_{i+k}}{L_k^{i-1} + L_{i+k}} (l_k - l_{k-1}); L_n^{i=1} = L_n (l_n - l_{n-1});$$

$$C_{1,\vartheta} = l_1 \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{2}; C_{k=2..n,\vartheta} = (l_{k-1} - l_{k-2}) \sum_{i=k-1}^n \frac{C_i}{2} + (l_k - l_{k-1}) \sum_{i=k}^n \frac{C_i}{2}; \quad (7)$$

$$C_{n+1,\vartheta} = (l_n - l_{n-1}) \frac{C_n}{2}.$$

где n – количество отходящих присоединений от питающей подстанции, L_i, C_i – удельные индуктивности и емкости отходящих присоединений, l_i – длина присоединения.

На основе изложенного подхода эквивалентизируются также смешанные участки сети, содержащие как кабельные, так и воздушные линии, и линии с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Разработанные методы редуцирования схем электрических сетей

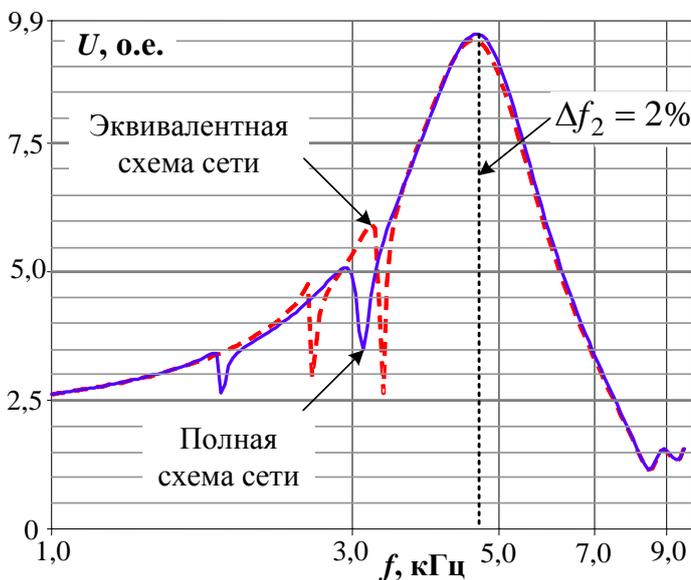


Рисунок 7 – Частотные характеристики полной схемы сети и эквивалентной схемы, где все фидеры одной РП заменены П-схемой

протестированы на модели реальной радиальной распределительной (преимущественно) кабельной сети 10 кВ. Амплитудно-частотные характеристики, полученные моделированием, показали, что отклонения частот в полной схеме сети и схеме, в которой одна РП (с отходящими протяженными ВЛ, чередующимися КЛ) заменена П-схемой, составили менее 2% (рис.7). Таким образом, расчетные схемы сетей могут быть многократно редуцированы (упрощены) без заметной потери точности локации ОЗЗ (при использовании, в основном, частотно-параметрического метода).

Во второй главе также излагается алгоритм определения высокоомных замыканий на землю, локация которых параметрическими и формализованными методами потенциально не возможна (или выполняется с высокой погрешностью). Требуемая точность локации ОЗЗ обеспечивается в том случае, когда переходный процесс характеризуется слабым затуханием свободных составляющих, т.е. выполняется условие $R_{зам} < 0,5Z_C = \sqrt{L_3 / C_3}$ (где L_3, C_3 – эквивалентные индуктивность и емкость сети).

Разработан подход определения высокоомного замыкания на землю по максимальному напряжению на нейтрали после погасания заземляющей дуги, которое зависит от переходного сопротивления замыкания $U_N = \zeta(R_{зам})$ (рис.8).

Для определения максимума напряжения на нейтрали (приблизительно совпадающего с моментом прохождения тока замыкания через нуль) используется

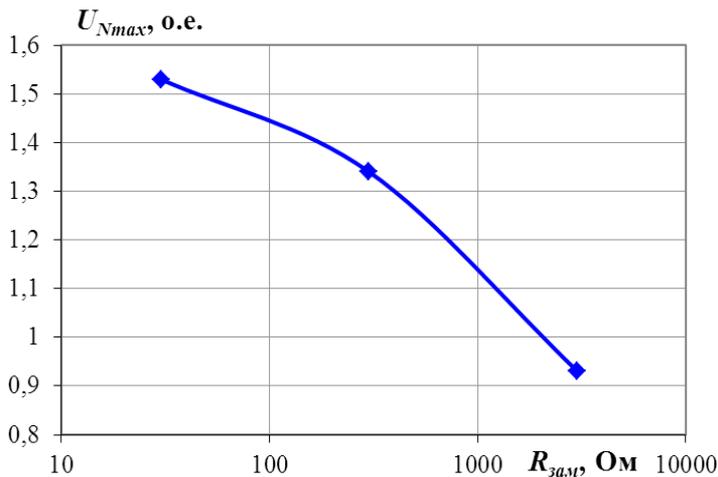


Рисунок 8 – Зависимость максимального значения напряжения на нейтрали от $R_{зам}$

производная напряжения на нейтрали, которая по характеру близка к току замыкания.

В целях исключения ошибки определения абсолютного максимума напряжения на нейтрали по моменту перехода его производной через нуль ($du_N/dt=0$), вызванной возможностью появления второстепенных колебаний (например, обусловленных разрядным процессом в линии), выполняется следующая последовательность

действий:

- напряжение на нейтрали обрабатывается фильтром низших частот (например, фильтром Чебышева I-го рода, 3-го порядка), подавляющим частоты, превышающие частоту перезарядного процесса;
- определяется момент перехода производной напряжения u_N через нуль – t_0 (рис. 9);
- осуществляется возврат от времени t_0 на некоторый временной интервал $\Delta t_{макс}$, на котором находится максимум модуля напряжения на нейтрали – $\max(|u_N|)$. Длительность временного интервала $\Delta t_{макс}$ принимается равной наибольшему периоду перезарядного процесса в сети.

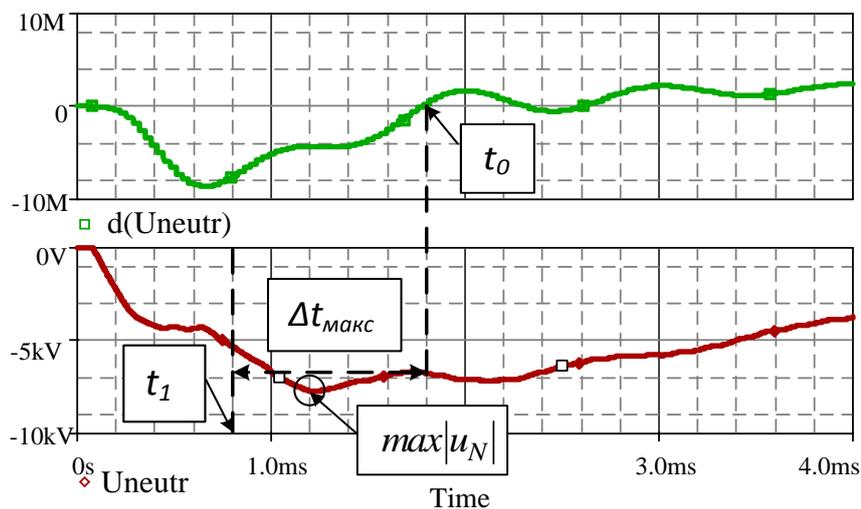


Рисунок 9 – Расчетные осциллограммы напряжения и тока при ОДЗ на расстоянии 4 км от шин питающей подстанции

На рисунке 10 в качестве примера приведены расчетные зависимости максимума напряжения U_N от переходного сопротивления в месте замыкания для РС с протяженной ВЛ с $Z_{C3} \approx 400 \div 600 \text{ Ом}$. Интенсивный переходный процесс и

надежная локация замыкания на землю выполняется при $R_{зам} < 200 \text{ Ом}$ и $U_N \geq 10 \text{ кВ} \approx 1,2U_{ф.м}$.

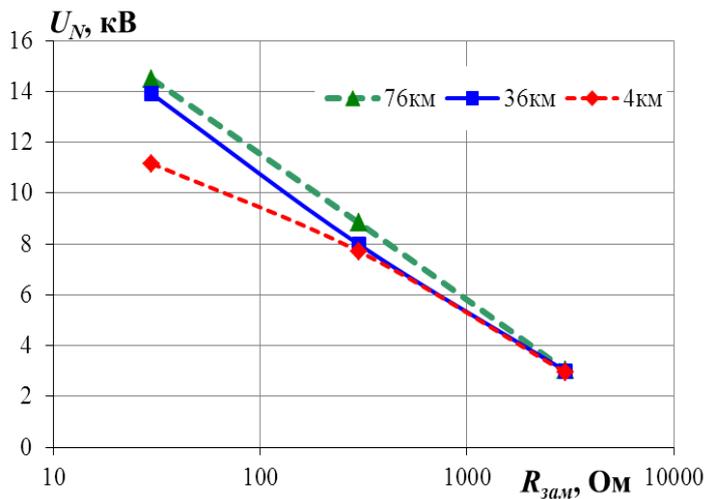


Рисунок 10 – Расчетные зависимости U_N от переходного сопротивления в месте замыкания для различных l_3

присуща конкретному месту повреждения. На рисунке 11 видно, что кривые напряжения на поврежденной фазе при удалении места замыкания от узла питания имеют тенденцию к сглаживанию и выпрямлению. Это свойство, обусловленное

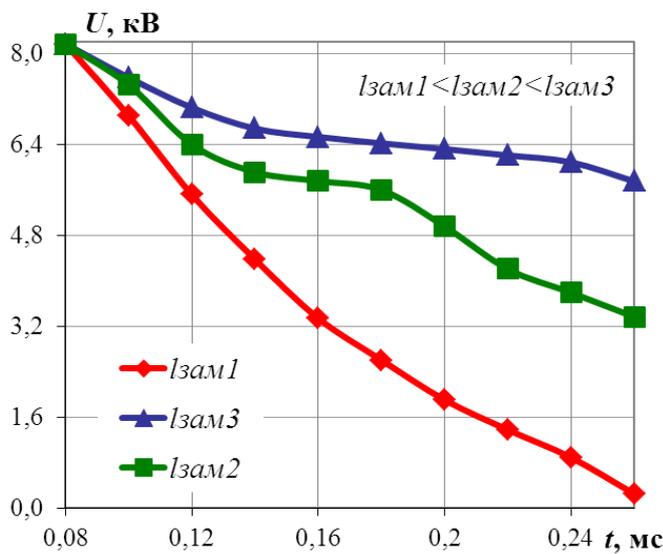


Рисунок 11 – Начальные части осциллограмм напряжения при изменении места ОДЗ относительно узла питания

l_3 – относительное (отнесенное к длине поврежденного кабеля) расстояние от шин питающей подстанции до места замыкания.

Из (8) видно, что основное влияние на частоту собственных колебаний напряжения f_2 оказывает фазная индуктивность поврежденной части кабеля или линии (от начала линии до места замыкания) и емкость этой части (в меньшей степени), что объясняет изменение характера переходного процесса при увеличении l_3 (эффект «сглаживания»).

В третьей главе излагается разработанный формализованный метод локации ОЗЗ, основанный на использовании математического аппарата *искусственных нейронных сетей* (ИНС). Данный метод не обладает недостатками, присущими частотно-параметрическому и дифференциально-параметрическому методам, в связи с принципиальным отличием в подходе к локации мест замыканий.

Характер осциллограмм напряжения (и тока) при ОЗЗ в электрической сети зависит от множества факторов, часть которых обусловлена зависимостью частоты f_2 собственных колебаний напряжения (в основном определяющей степень крутизны осциллограммы напряжения в момент замыкания) от расстояния до места замыкания, является преобладающим в процессе обучения ИНС. Частоту f_2 можно приблизительно определить следующим образом:

$$f_2 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi\sqrt{C_3L_3 + 2C_3L_{п3} + L_{п3}C_{п3}^2}}, \quad (8)$$

где L – эквивалентная индуктивность РС; C_3, L_3 – эквивалентные параметры неповрежденных линий; $C_{п3}, L_{п3}$ – фазная емкость и индуктивность поврежденной линии;

Исследования показали, что задача распознавания образов переходного процесса при замыкании на землю реализуется с помощью несложной ИНС, основанной на однослойном персептроне.

Задача ИНС состоит в сопоставлении измерительного образа, полученного в результате непрерывного мониторинга, с набором расчетных образов для различных расстояний l_3 .

Формализованный метод локации ОЗЗ состоит из следующих этапов:

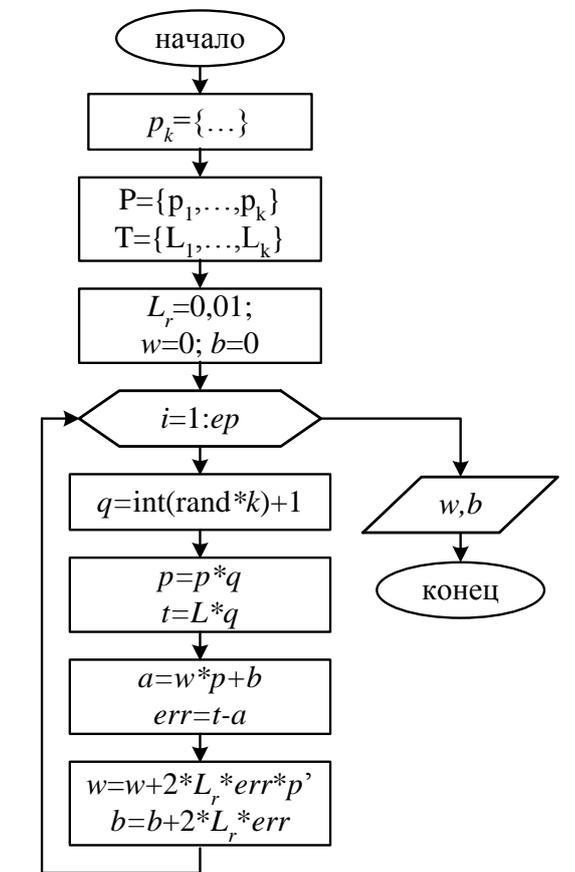
1. Формирование набора расчетных или экспериментальных осциллограмм напряжения на поврежденной фазе при изменении местоположения ОДЗ для конкретного участка РС.

2. Преобразование информативной части полученных осциллограмм в образы, предназначенные для обучения или тестирования ИНС при помощи разработанного алгоритма, позволяющего первоначально преобразовывать осциллограммы в формальные матрицы размерностью $n \times n$, а затем в вектор-

столбцы, состоящие из n^2 элементов и являющиеся входными сигналами персептрона. Начало информативного участка определяется моментом максимума производной фазного напряжения (абсолютного значения), а продолжительность равна полупериоду собственных колебаний фазного напряжения при наиболее близко расположенном к узлу питания ОЗЗ ($t_{обп} = 1 / (2f_{2max})$).

3. Обучение персептрона на полученном множестве обучающих пар выполняется при помощи алгоритма обратного распространения ошибки (рис.12). В процессе обучения ИНС корректирует свои параметры (w, b) с целью минимизации функции ошибки нейронной сети, основываясь лишь на информации о верном значении выходного параметра (l_3) при заданных входных данных (образы переходных процессов при ОЗЗ).

Работоспособность разработанного метода локации была апробирована на участке реальной РС 10 кВ, содержащей протяженную ВЛ. Расчеты переходных процессов осуществлялись в программном



p_k – входной вектор-образ; P – массив обучающих векторов; T – массив целевых выходов; ep – кол-во циклов обучения; w, b – весовые коэффициенты персептрона и пороговый элемент

Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма обучения персептрона

комплексе PSpice, при этом для моделирования ВЛ была разработана специальная модель, учитывающая частотные зависимости первичных и волновых параметров линий в контуре нулевой последовательности, что позволило получать достоверные образы переходных процессов при моделировании ОЗЗ.

В ходе апробации метода были проведены многовариантные исследования влияния параметров алгоритма обучения на точность локации и определены оптимальные. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты влияния параметров алгоритма обучения на погрешность локации ОЗЗ

№ п/п	Влияющий параметр	Диапазон изменения	Оптимальное значение
1	Число обучающих пар	4..10	>4
2	Распределение обучающих образов (мест замыканий) по длине ВЛ	1) распределение по экспоненциальному закону; 2) равномерное распределение	по экспоненциальному закону
3	число циклов обучения	3500..10000	не влияет

С учетом определенных оптимальных параметров процедуры обучения проведены исследования влияния параметров конфигурации персептрона (количества входных элементов) на точность локации. При изменении данного параметра в диапазоне от 49 до 225 элементов определено его оптимальное значение, соответствующее минимальной средней погрешности распознавания – 19,8%, которое составило 100 входных элементов (формальная матрица переходного процесса размерностью 10×10).

Применение разработанной *методики итерационного подхода к распознаванию* образов переходных процессов позволило существенно улучшить точность локации за счет поэтапного сужения диапазона обучающей выборки (диапазона расстояний l_3 до места замыкания) и, как следствие, уплотнения сетки обучающих образов.

Сравнительные результаты распознавания тестовых образов, полученные для первой и второй итераций, приведены в таблице 2. Среднее значение погрешностей локации после второй итерации уменьшается в несколько раз.

Таблица 2 – Результаты распознавания образов ПП при итерационном подходе

№ образа п/п	Тестовые образы, км	1-ая итерация			2-ая итерация		
		Факт, км	Отн. погр-ть, %	Абс. погр-ть, км	Факт, км	Отн. погр-ть, %	Абс. погр-ть, км
1	5	10,1	102,6	5,1	4,6	8,3	0,4
2	12	16,3	35,6	4,3	13,6	13,5	1,6
3	20	23,1	15,3	3,1	21,6	8,0	1,6
4	28	28,7	2,4	0,7	26,2	6,3	1,8
5	36	35,5	1,3	0,5	38,1	5,9	2,1
6	44	43,9	0,3	0,1	45,5	3,3	1,5
7	52	47,6	8,4	4,4	52,3	0,6	0,3
8	60	56,3	6,2	3,7	59,7	0,5	0,3
9	68	73,4	7,9	5,4	68,6	0,9	0,6
10	76	62,5	17,7	13,5	72,3	4,9	3,7
Среднее	-	-	19,8	4,1	-	5,2	1,4

Таким образом, локация ОЗЗ в РС с удовлетворительными уровнями погрешностей ($\approx 5-10\%$) выполняется путем перцептронного распознавания образов на основании двухитерационного подхода.

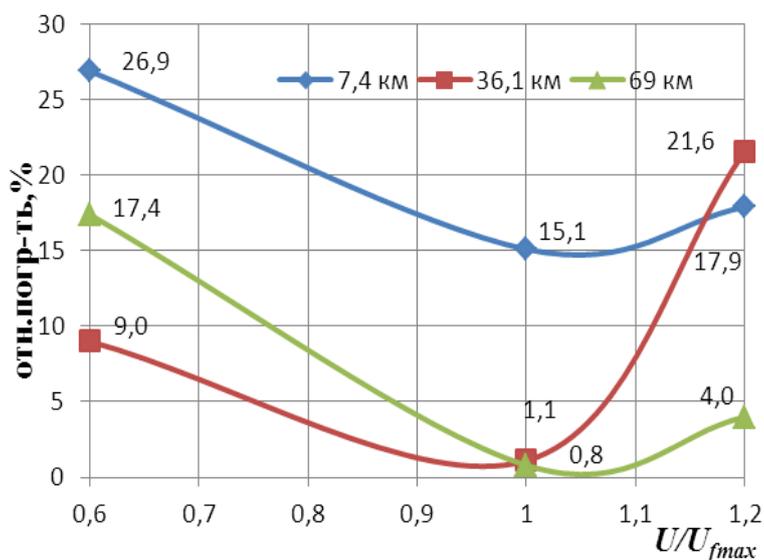


Рисунок 13 – Результаты локации повторных ОЗЗ после 2-ой итерации распознавания

Проведенные исследования возможности применения формализованного метода для локации повторных замыканий показали, что принципиально работа метода ничем не отличается от случая распознавания первичного пробоя, однако, погрешности локации ОЗЗ в данном случае значительно превышают погрешности при первичных пробоях фазной изоляции (рис.13).

Применение разработанного метода локации ОЗЗ на основе ИНС принципиально возможно также в сетях с заземлением нейтрали сети через дугогасящий реактор или высокоомный резистор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе в рамках решения комплексной задачи on-line диагностики РС исследованы и разработаны методы распознавания ОЗЗ (в т.ч. единичные и кратковременные пробои изоляции) в сетях с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью, которые обеспечивают высокую достоверность распознавания и не требуют дополнительных измерений кроме фазных напряжений, а также методы локации замыканий на землю под рабочим напряжением, основанные на анализе характера переходного процесса при ОЗЗ и позволяющие с высокой степенью точности определять зону повреждения в РС.

В рамках проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработан способ распознавания ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью, который основывается на свойстве относительной неизменности величины напряжения нулевой последовательности после самогашения заземляющей дуги. Определена оптимальная длительность процессирования измерительных данных, необходимая для достоверного распознавания.

2. Для РС, содержащих протяженные ВЛ, разработан способ распознавания ОЗЗ, основанный на анализе предаварийных напряжений и переходных напряжений в момент замыкания на землю.

3. Распознавание ОЗЗ в сетях с резонансно-заземленной нейтралью и одновременное выделение поврежденной фазы реализуется с помощью метода, основанного на свойстве медленного восстановления переходного напряжения на поврежденной фазе после погасания заземляющей дуги. Регистрация фазных

напряжений и их последующий анализ позволяют достоверно выделить замыкание на землю. Определены необходимые параметры метода: значение признака замыкания равно $K_{min}=3$ и оптимальное время интегрирования, которое для сетей с коэффициентом компенсации емкостного тока 80-120%, составляет 3 мс.

4. Доказана теоретическая возможность применения параметрических методов для локации однофазных замыканий в РС и выполнена практическая проверка их работоспособности в воздушных и кабельных сетях путем сопоставления с результатами мониторинга и полевых испытаний. Оценка погрешности данных методов составляет 5-10% в сетях с малым затуханием переходного напряжения.

5. Определены параметры, изменяющие частоты собственных колебаний и влияющие на точность локации: сопротивление канала дуги, топология и нагрузка электрической сети. Установлено, что незначительное изменение емкостных параметров сети и нагрузки (5-10%) при измерении расстояния до места замыкания в РС может корректироваться с помощью поправочных коэффициентов, более значительные изменения – с помощью полиномов низкого порядка.

6. Разработана методика эквивалентирования сложных радиальных схем, которая может быть использована для определения расчетных частотных характеристик в частотно-параметрическом методе в аппаратно-программных измерительных системах с малой производительностью – в частности, в микроконтроллерах.

7. Разработана методика выделения высокоомного замыкания на землю, основанная на измерении начального напряжения на нейтрали сети после гашения заземляющей дуги. Установлено, что для выполнения точной локации замыкания на землю в распределительной воздушной сети начальное напряжение должно составлять $\sim 1,2U_{ф.м}$.

8. Для программного комплекса PSpice разработана модель воздушной линии электропередачи, учитывающая частотные зависимости первичных и волновых параметров линий в контуре нулевой последовательности, позволяющая получать достоверные образы переходных процессов, используемые для локации.

9. Разработан формализованный метод локации ОДЗ в РС среднего класса напряжения, основанный на использовании математического аппарата ИНС, который не имеет высоких требований к аппаратной части вычислительных средств, прост в реализации и может иметь широкое практическое значение.

10. Определены наиболее благоприятные комбинации параметров формализованного метода с точки зрения точности локации ОЗЗ и разработан итерационный подход к распознаванию образов переходных процессов, позволяющий достичь хорошей точности определения мест повреждения. Показано, что количество итераций, при которых достигается точность локации $\sim 5...10\%$, не превышает 2.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в изданиях, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. Патент РФ № 2356062 (от 16.10.2007), МПК H02H 3/16. Способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в распределительных сетях с изолированной нейтралью/ Богдашева Л.В., Качесов В.Е. // БИ №14, 2009.

2. Богдашева Л.В., Качесов В.Е. О параметрических методах локации однофазных замыканий в распределительных сетях // Научный вестник НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. № 3 (24). С. 131-140.

3. Качесов В.Е., Квривишвили Л.В. Распознавание однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Специальный выпуск. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2008. № 1. С. 94-98.

4. Качесов В.Е., Квривишвили Л.В. Распознавание однофазных замыканий на землю в распределительных сетях // Электричество. 2010. № 12. С. 8-18.

Научные работы, опубликованные в сборниках научных трудов Международных и Российских конференций:

5. Богдашева Л.В. Методы локации однофазных повреждений в распределительных сетях // Труды VI Всероссийского студенческого научно-технического семинара «Энергетика: экология, надежность, безопасность». Томск: Изд-во ТПУ, 2004. С.28-30.

6. Богдашева Л.В., Качесов В.Е., Кузнецов Н.Д., Луферов В.С., Дегтярев И.Л. Локация однофазных дуговых замыканий в сетях 10 кВ // Труды Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. С.168-173.

7. Богдашева Л.В. Использование искусственных нейронных сетей для определения расстояния до места замыкания в распределительных сетях // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 6-ти частях «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск, 2004. Ч.3. С.72-74.

8. Богдашева Л.В. Учет топологии и нагрузки при локации однофазных дуговых замыканий параметрическими методами // Труды VII Всероссийского студенческого научно-технического семинара «Энергетика: экология, надежность, безопасность». Томск: Изд-во ТПУ, 2005. С.70-72.

9. Bogdasheva L., Kachesov V. Parametric On-line Fault Location Methods for Distribution MV Networks. // in Proc. the IEEE PowerTech. St.-Petersburg, Jun. 2005. P. 159. [Параметрические методы локации замыканий в режиме реального времени для распределительных сетей среднего класса напряжения].

10. Богдашева Л.В. Редукция порядка расчетных схем в параметрических методах локации однофазных дуговых замыканий // Труды VIII Всероссийского студенческого научно-технического семинара «Энергетика: экология, надежность, безопасность». Томск: Изд-во ТПУ, 2006. С. 53-56.

11. L. Bogdasheva, V. Kachesov. Making Allowance for Varied Load and Network Topology in Parametric Location of Phase-to-Ground Faults // in Proc. the 7th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE2006). Brno, May, 2006. P.122. [Учет нагрузки и топологии сети в параметрических методах локации однофазных замыканий].

12. Богдашева Л.В., Дементьев Е.Н., Качесов В.Е., Михеев В.П., Орлянский А.В., Остапенко О.Н., Шевченко С.С. On-line диагностика распределительных сетей // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ». Новосибирск, 2006. С.202-207.

13. Богдашева Л.В. Метод распознавания однофазных дуговых замыканий на землю и поврежденной фазы в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ти частях «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. Ч.3. С. 192-193.

14. Квривишвили Л.В. Применение искусственных нейронных сетей для локации однофазных замыканий на землю в распределительных сетях // Материалы докладов III молодежной Международной научной конференции «Тинчуринские чтения», посвященной 40-летию КГЭУ, в 4-х томах. Казань: Изд-во КГЭУ, 2008. Т.1. С. 55-56.

15. Квривишвили Л.В. Локация однофазных замыканий на землю в распределительных сетях с помощью искусственных нейронных сетей // Научные труды МНТК «Электроэнергетика глазами молодежи». В 3 т. Самара: СамГТУ, 2011. Т.2. С. 290-295.