

На правах рукописи

КЛОЧКОВ Андрей Николаевич

**Совершенствование методики расчета и средств регистрации
аварийных режимов сельских сетей 10 кВ**

**Специальность: 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве»**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

МОСКВА 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Попов Николай Малафеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Воробьев Виктор Андреевич

кандидат технических наук, доцент
Виноградов Александр Владимирович

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева»

Защита состоится «___» _____ 2012 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 220.044.02 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина», по адресу: 127550, г. Москва, ул. Лиственничная аллея, д. 16-а, корпус 3, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина».

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Андреев С.А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена решению задачи регистрации в сети 10 кВ обрывов фазных проводов, в том числе с замыканием на землю со стороны потребителя. В процессе эксплуатации распределительных сетей зафиксированы случаи, когда аварийный режим обрыва фазного провода с замыканием на землю в сети 10 кВ с изолированной нейтралью обнаруживался только после поступления сообщения диспетчеру от населения. При этом устройство сигнализации подобных повреждений на питающей подстанции было исправно, но не сработало. Нерешенность задачи своевременной регистрации в сети 10 кВ обрывов проводов с замыканием их на землю со стороны потребителя снижает надежность электроснабжения потребителей из-за большой продолжительности процесса отыскания повреждения: останавливается технологический процесс на предприятиях, лежащий на земле под напряжением провод представляет опасность для жизни людей и животных.

Обзор существующих и используемых защит в сетях 10 кВ в сельской местности и методов расчета аварийных режимов позволяет сделать вывод, что выбор уставок устройств сигнализации замыкания на землю подбирается опытным путем в процессе эксплуатации. Объясняется это тем, что в сельских сетях 10 кВ объективно возникают аварийные режимы, не получившие теоретического описания с помощью существующих методов расчета.

Анализ исследований по расчету аварийных режимов и созданию эффективных защит, проведенных учеными С.А. Ульяновым, С.А. Бургучевым, Н.А. Мельниковым, А.М. Федосеевым, В.Л. Фабрикантом, А.М. Мусиным, А.О. Грундулисом, М.И. Пронниковой, И.А. Будзко, Ф.Д. Косоуховым, Т.Б. Лещинской, В.А. Воробьевым, Р.Х. Юсуповым, И.В. Наумовым, Н.М. Поповым, В.А. Солдатовым, Л.П. Андриановой, А.И. Шалиным показал, что теорией описаны аварийные режимы только в случае возникновения любого из них в отдельности. Совместное влияние аварийных режимов на токи и напряжения в сети 10 кВ не рассматривалось.

Таким образом, разработка математических моделей элементов сети 10 кВ с изолированной нейтралью, позволяющих вести расчет сложных аварийных режимов, в том числе обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя, методом фазных координат, разработка методики расчета таких сложных аварийных режимов и разработка устройства оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ являются актуальной.

Научная концепция. Основываясь на результатах исследований ученых и объективно существующих закономерностях, предлагается совершенствовать методику расчета сложных аварийных режимов сетей 10 кВ с изолированной нейтралью метод фазных координат и разработать алгоритм обнаружения повреждений сравнивая фазные напряжения и напряжение нулевой последовательности на питающей подстанции с регистрацией обрывов проводов у потребителя.

Целью исследования является совершенствование методики расчета сложных аварийных режимов сети 10 кВ с разработкой алгоритма фиксации на подстанции режима обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя и создание устройства оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих **задач**:

1. Провести анализ существующих методик расчета аварийных режимов сетей 10 кВ с изолированной нейтралью.
2. Для сети 10 кВ разработать математические модели линий электропередачи, нагрузки, трансформатора 35/10 кВ со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник», аварийного участка линии электропередачи с учетом влияния земли как четвертого проводника.
3. Усовершенствовать методику расчета сложных аварийных режимов, в том числе обрывов фазных проводов с замыканием на землю со стороны потребителя, для сети 10 кВ с изолированной нейтралью.
4. Теоретически исследовать влияние различных параметров сети и аварийных режимов на значения токов и напряжений в различных ее точках. Дать рекомендации по настройке существующих устройств релейной защиты и сигнализации.
5. Обосновать и показать возможность использования средств визуального моделирования для расчёта параметров сетей 10 кВ в аварийных режимах.
6. Разработать устройство для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ, способное ускорить отыскание места повреждения.
7. Разработать алгоритм фиксации на питающей подстанции режима обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя.
8. Экспериментально проверить эффективность разработанного устройства и определить экономическую эффективность его работы.

Объектом исследования являются сельские сети 10 кВ с изолированной нейтралью в сложных аварийных режимах обрыва линейных проводов с замыканиями на землю.

Предметом исследования являются закономерности изменения тока и напряжения нулевой последовательности на питающей подстанции в сложных аварийных режимах сетей 10 кВ.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался метод фазных координат, теория электрических цепей, методы математического и регрессионного анализа, теория надежности электронных устройств и электрических систем, компьютерное моделирование.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработана методика расчета сетей 10 кВ с изолированной нейтралью с учетом земли как четвертого проводника, для которой созданы математические модели линии электропередачи, нагрузки потребителей, трансформатора 35/10 кВ со схемой соединений обмоток «звезда-треугольник», аварийного участка линии электропередачи.
2. Получены зависимости величины и направления вектора напряжения нулевой последовательности от параметров сети и аварийного режима.

Наиболее существенные результаты, полученные лично соискателем:

1. Разработаны математические модели элементов сети 10 кВ для метода фазных координат с учетом земли как четвертого проводника.
2. Разработана методика расчета токов и напряжений сетей 10 кВ с изолированной нейтралью в сложных аварийных режимах, в том числе при обрыве фазного провода с замыканием на землю.
3. Получена зависимость напряжений нулевой последовательности, фиксируемого на питающей подстанции, при обрыве фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя от значений переходного сопротивления в месте замыкания, длины линий и нагрузки потребителей.
4. Разработано устройство для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ. На данное устройство получен патент РФ на полезную модель.
5. Разработана библиотека математических моделей элементов сети 10 кВ с изолированной нейтралью для метода фазных координат в пакете Simulink математического комплекса MATLAB.

Достоверность результатов подтверждается тем, что результаты проведенных аналитических исследований согласуются с результатами производственных измерений с расхождением не более 5%.

Практическая ценность работы. Полученные результаты исследований использованы:

- при разработке устройства для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ;
- при разработке рекомендаций по настройке существующих устройств релейной защиты и сигнализации;
- при разработке библиотеки моделей для расчета сетей с изолированной нейтралью методом фазных координат в пакете Simulink математического комплекса MATLAB;
- при составлении алгоритма работы сигнализации о режиме обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя.

Реализация результатов работы.

- Устройство для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ внедрено на предприятии СПК «Родина» Красносельского района Костромской области.
- Разработанная методика расчета режимов сельских сетей 10 кВ с изолированной нейтралью используется в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Костромская ГСХА» при изучении дисциплин «Электроснабжение» и «Релейная защита».

Научная апробация работы. Основные положения и результаты научной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях ФГОУ ВПО «Костромская ГСХА» (г. Кострома, 2008-2009 гг.), ФГОУ ВПО Орловский ГАУ (г. Орел, 2009 г.), ФГОУ ВПО СПбГАУ (г. Санкт-Петербург, 2010-2011 г.)

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 7 печатных работах общим объёмом 6,52 п.л., из них на долю соискателя приходится 2,7 п.л., в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общего заключения и списка литературы из 100 наименований и 4 приложений, включает 159 страниц, 32 рисунка, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, сформулирована цель исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту диссертации, а также данные о практической ценности и научной новизне работы.

В первой главе «Анализ надежности сетей 10 кВ и методик расчета аварийных режимов» рассматриваются возможные аварийные режимы и методы их расчета в сети 10 кВ, а также изменения в распределении токов и напряжений в сети и у потребителя.

Проведенный анализ зафиксированных ненормальных режимов в сельских сетях 10 кВ с изолированной нейтралью показал, что их можно разделить на четыре типа: различные виды коротких замыканий (КЗ); обрывы фазных проводов; замыкания на землю (ЗЗ) одной из фаз и сочетания перечисленных режимов. Режимы КЗ подробно изучены, и для снижения их последствий созданы высоконадежные аппараты релейной защиты.

Замыкания на землю, сопровождаемые протеканием токов менее 5 А, в сельских сетях 10 кВ зачастую не требуют отключения линии с поврежденной изоляцией, но при этом представляют опасность для жизни людей и животных и негативно влияют на надежность работы сети. О возникновении ЗЗ судят по устройствам сигнализации на питающей подстанции. Однако в процессе эксплуатации зафиксированы случаи несрабатывания устройств сигнализации, в результате чего сеть может работать продолжительное время в таком режиме. Негативное влияние на надежность подобных режимов заключается в действиях на изоляцию напряжения, значением выше номинального, и протекания токов по непредусмотренным для этого конструкциям. В результате снижается вероятность безотказной работы и повышается интенсивность отказов. Длительное время поиска повреждения снижает значение таких критериев надежности как коэффициент готовности и коэффициент технического использования.

Для расчета аварийных режимов в сетях с изолированной нейтралью обычно используют метод симметричных составляющих, а в последнее время – метод фазных координат. Метод симметричных составляющих представляет токи и напряжения в любой точке сети как сумму составляющих трех последовательностей. Этот подход затрудняет его использование для расчета разветвленных сетей, поскольку необходимо составлять 3 схемы замещения.

По методу фазных координат любой элемент сети представляется 2К-полюсником, где К – количество фаз или проводов, 2 – количество входов и выходов одной фазы или провода элемента. Таким образом, для трехпроводной

сети любой элемент может быть представлен в виде шестиполюсника, имеющего соответственно три входа и три выхода. Напряжения в каждой точке сети определяются относительно узла нулевого потенциала, и по ним рассчитываются фазные и междуфазные напряжения. Напряжения и токи на входах и выходах 2К-полюсников зависят от схемы и параметров замещаемого устройства. Параметры схемы 2К-полюсника представляют собой модель участка сети в форме Н или Y.

2К-полюсники в форме Y позволяют вычислять токи на входе и на выходе участка по напряжениям в начале и в конце участка:

$$In_i = Ya_i Un_i + Yb_i Uk_i ; \quad (1)$$

$$Ik_i = Yc_i Un_i + Yd_i Uk_i , \quad (2)$$

где Un_i, Uk_i, In_i, Ik_i — напряжения и токи в начале и в конце i -го участка, представляющие собой векторы-столбцы с размерностью, соответствующей количеству фаз или проводов;

Ya_i, Yb_i, Yc_i, Yd_i — параметры 2К-полюсника i -го участка в форме Y, представляющие собой квадратные матрицы с размерностью, соответствующей количеству фаз или проводов.

2К-полюсники в форме Н позволяют определять напряжение и ток на входе по значению напряжения и тока на выходе. Для них справедливы соотношения:

$$Un_i = A_i Uk_i + B_i Ik_i ; \quad (3)$$

$$In_i = C_i Uk_i + D_i Ik_i , \quad (4)$$

где A_i, B_i, C_i, D_i — параметры 2К-полюсника i -го участка в форме Н, представляющие собой матрицы с размерностью, соответствующей количеству фаз или проводов.

От параметров 2К-полюсника в форме Н можно переходить к параметрам 2К-полюсника в форме Y и обратно по известным соотношениям.

После того, как матрицы параметров для всех элементов составлены, определяют матрицу эквивалентных параметров всей сети. Для этого последовательно попарно перемножают матрицы параметров двух ближайших элементов, начиная с конца линии. В конечном итоге формулу для нахождения обобщенных параметров сети можно записать:

$$HE = \prod_{i=1}^N H_i , \quad (5)$$

где HE — эквивалентная матрица параметров AE, BE, CE, DE всей сети в форме Н;

H_i — матрица параметров i -го элемента A_i, B_i, C_i, D_i сети в форме Н.

Зная эквивалентные параметры всей сети HE и напряжение в начале сети Un можно найти напряжение в конце сети по формуле:

$$Uk = AE^{-1} \cdot Un. \quad (6)$$

По напряжениям в начале и конце сети, а также по параметрам всех элементов в форме N можно найти токи и напряжения в любой точке по формулам (3) и (4).

Для расчетов различных режимов сетей с изолированной нейтралью методом фазных координат обычно используют модели трехпроводных линий, трансформаторов, нагрузки. Используя данные модели невозможно рассчитать значение токов замыкания на землю в режиме ОЗЗ. Это объясняется тем, что влияние земли на распределение токов и напряжений учитывается в виде связи линии электропередачи с узлом нулевого потенциала.

Существующие средства сигнализации и защиты от однофазных ЗЗ в сетях с изолированной нейтралью используют в своей работе данные о токах и напряжениях нулевой последовательности, токах переходного процесса при замыкании провода на землю, высокочастотных составляющих тока в переходном режиме и наложенных токах. Наибольшее распространение получили устройства на основе фильтров тока и напряжения нулевой последовательности из-за своей простоты и надежности. При расчете уставок данных защит учитывается влияние небалансов, что требует снижения чувствительности защит. На практике зачастую точный расчет не производится, а уставки выбираются на основе табличных значений или опытным путем.

Таким образом, современные методики расчета не позволяют анализировать работу сети в режиме, когда провод одной из фаз оборван и замыкается на землю со стороны потребителя. С их помощью нельзя проследить влияние нагрузок потребителей, протяженности сетей и переходных сопротивлений в месте соединения провода с землей на уровень напряжения на подстанции. Поэтому отсутствуют рекомендации по выбору уставок устройств сигнализации в таких режимах.

Во второй главе «Совершенствование расчета токов и напряжений в сложных аварийных режимах методом фазных координат» предлагается усовершенствованная методика, позволяющая вести расчет режимов сетей с изолированной нейтралью с учетом влияния земли на распределение токов и напряжений.

Для современного метода фазных координат свойственно предположение, что земля является не проводом, а узлом нулевого потенциала. Такое утверждение справедливо при расчетах сетей различной конфигурации при условии, что ни один ток не протекает по контуру, в котором одной из ветвей является земля. В случае несоблюдения данного условия (как, например, при ЗЗ) токи в двух ветвях контура, связанных с землей, должны будут протекать во встречных направлениях, чего на практике не наблюдается. К тому же соединение любой из ветвей с узлом нулевого потенциала через малое сопротивление является причиной появления в ветви токов КЗ, что нереально для сети с изолированной нейтралью.

Для исключения подобной ошибки предлагается в расчетах сети с изолированной нейтралью учитывать влияние земли как дополнительного проводника, имеющего малое сопротивление. Стоит отметить, что данный

проводник не должен быть связан с источником напряжения напрямую, иначе ошибка устранена не будет. Это можно сделать, например, введя дополнительный элемент в начале линии, матрица продольных сопротивлений которого будет содержать значение порядка 10^6 Ом для четвертого проводника. Учет влияния земли как дополнительного проводника позволит избежать ошибки при расчетах режимов замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, а также позволит согласовать модели элементов сетей с изолированной и глухозаземленной нейтралью. К достоинствам данного подхода также можно отнести тот факт, что для анализа несимметричных режимов работы сети с помощью метода фазных координат в расчетную схему не требуется вводить сложную модель трансформатора. Значения фазных напряжений могут быть заданы вектором-столбцом непосредственно в начале линии, что ранее было невозможно. Таким образом, сеть с изолированной нейтралью в режиме обрыва с замыканием на землю можно представить схемой замещения (рис.1.)

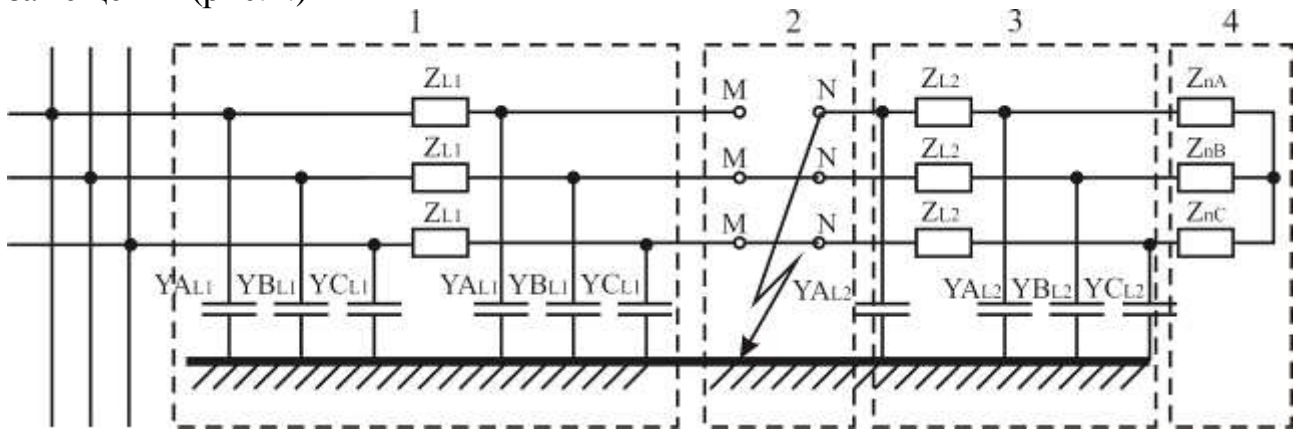


Рисунок 1 — Расчетная схема сети с изолированной нейтралью

Эту же схему в виде 2К-полюсников можно представить (рис. 2):

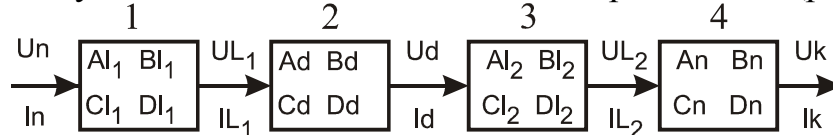


Рисунок 2 – Схема сети в виде 2К-полюсников

где 1 — модель линии до повреждения; 2 — модель поврежденного участка; 3 — модель линии после повреждения; 4 — модель нагрузки.

В данной схеме участок линии можно представить П-образной схемой замещения, в общем случае, относительно всех ее «К» проводов: три фазных провода и земля (рис. 3).

Собственные и взаимные активные (R) и индуктивные (X) сопротивления проводов представлены элементами матрицы Zl :

$$Zl = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & 0 \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} & 0 \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{44} \end{bmatrix};$$

где каждый элемент матрицы имеет вид $Zl = R + jX$.

В общем случае все элементы матрицы продольных и взаимных сопротивлений отличны от нуля, что говорит о том, что между проводниками существует магнитная связь. Для линий напряжением до 35 кВ взаимную индуктивность не учитывают, поэтому в матрице ненулевыми останутся только диагональные элементы.

Собственные и взаимные активные (G) и емкостные (B) проводимости проводов представлены элементами матрицы Yl :

$$Yl = \begin{bmatrix} Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} & -Y_{12} & -Y_{13} & -Y_{14} \\ -Y_{12} & Y_{12} + Y_{23} + Y_{24} & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{13} & -Y_{23} & Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} & -Y_{34} \\ -Y_{14} & -Y_{24} & -Y_{34} & Y_{14} + Y_{24} + Y_{34} \end{bmatrix};$$

где каждый элемент матрицы имеет вид $Yl = G + j \cdot B$.

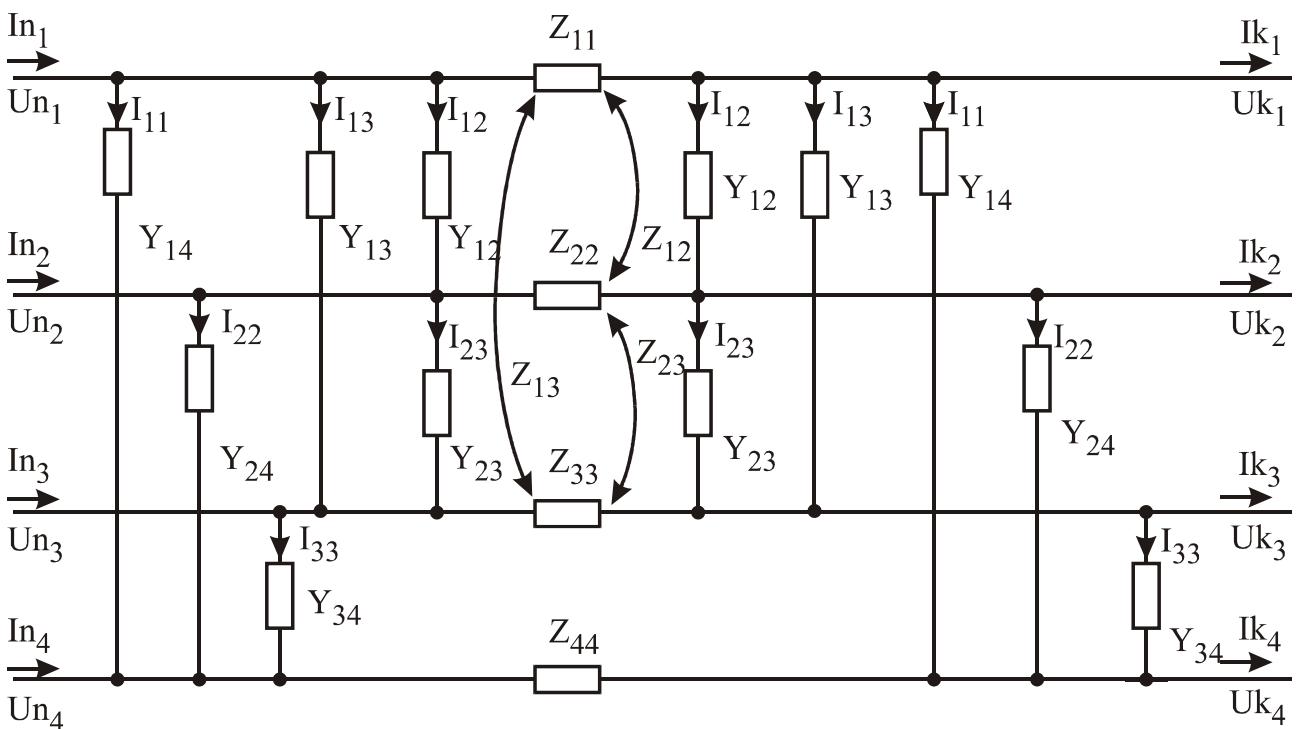


Рисунок 3 — «П»-образная схема замещения 3-х фазной линии электропередачи с учетом земли как четвертого проводника

Для упрощения получения общих параметров 2К-полюсника линии разделяют полную схему замещения (см. рис. 4) на три блока: первый и третий блок включают только поперечные сосредоточенные проводимости $Yl/2$, а второй блок содержит только продольные сопротивления Z . Каждый из указанных блоков представим в виде 2К-полюсника в форме «Н».

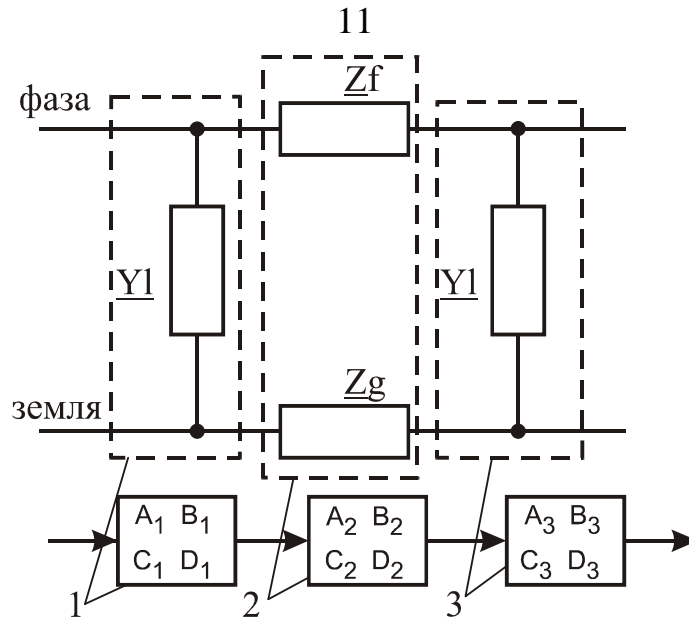


Рисунок 4 — Представление схемы замещения линии в виде 2К-полюсников где 1 и 3 — модель блока проводимостей; 2 — модель блока продольных сопротивлений; Z_f — продольное сопротивление фазных проводов; Z_g — продольное сопротивление грунта.

Параметры первого и третьего блока будут одинаковы. Для каждого блока можно записать известные соотношения параметров:

$$\begin{aligned} A_1 &= E; B_1 = 0; C_1 = Yl; D_1 = E; \\ A_2 &= E; B_2 = Zl; C_2 = 0; D_2 = E. \end{aligned}$$

Тогда общие параметры 2К-полюсника линии определяются, как произведение параметров отдельных блоков продольного сопротивления и поперечных проводимостей и будут равны:

$$\begin{aligned} A_l &= E + Zl Yl; B_l = Zl; \\ C_l &= 2Y + Yl Zl Yl; D_l = E + Yl Zl. \end{aligned}$$

где E — единичная матрица размерностью 4×4 ;

Zl — матрица продольных сопротивлений линии, состоит из подматриц Z_f и Z_g ;

Yl — матрица поперечных проводимостей линии.

Для расчета сетей с изолированной нейтралью нет необходимости учитывать всю схему потребительской сети. Достаточно знать параметры эквивалентной нагрузки по фазам, тогда можно составить матрицу узловых проводимостей и по ней определить параметры нагрузки в форме N . Матрица узловых проводимостей Y_n составляется для нагрузки, включенной по схеме «звезда» по известным правилам, и имеет размерность 5×5 . Для согласования данной матрицы с четырехпроводной сетью необходимо эквивалентировать ее относительно четырех узлов. Этот метод известен в литературе, как метод замены многолучевой звезды проводимостей эквивалентным многоугольником. Для исключения узла 5 общую матрицу узловых проводимостей разбивают на четыре подматрицы проводимостей, которые обозначают Y_{n11} , Y_{n12} , Y_{n21} , Y_{n22} .

Окончательно эквивалентную матрицу проводимостей размерностью 4×4 вычисляют по формуле:

$$Y_{nE} = Y_{n11} - Y_{n12} Y_{n22}^{-1} Y_{n21}.$$

Вид параметров $2K=8$ -полюсника нагрузки, соединенной по схеме «звезда без нулевого провода»:

$$A_n = E; \quad B_n = 0; \quad C_n = Y_n E; \quad D_n = E.$$

Для определения токов и напряжений в линии в режиме обрыва с замыканием на землю в расчетную схему должен быть введен дополнительный элемент, который описывает несимметрию. Обрыв фазного провода с замыканием одного из концов на землю моделируется участком с обрывом фазного провода и двумя участками с замыканием на землю до и после обрыва для обеспечения универсальности созданной модели.

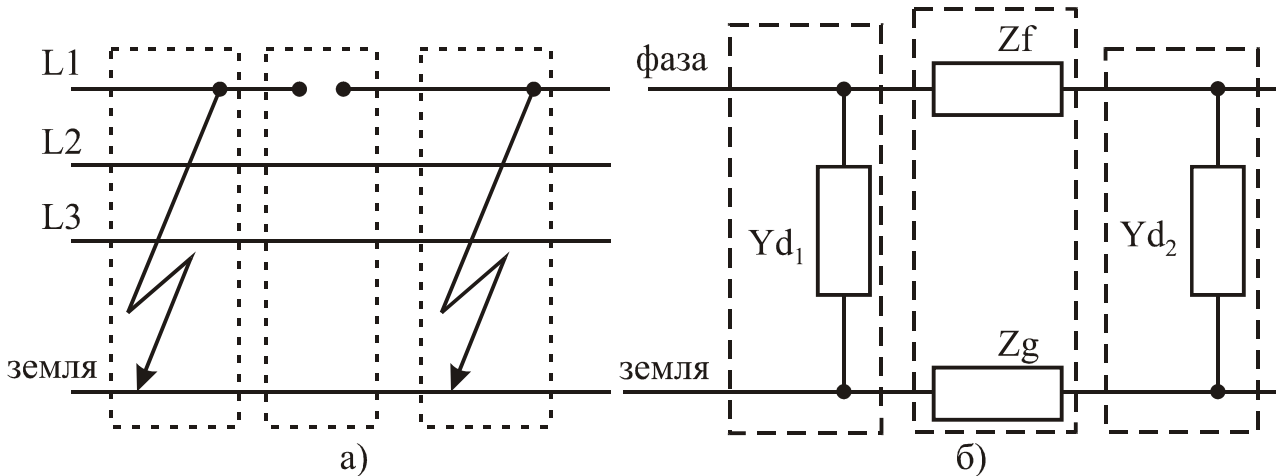


Рисунок 5 — Схема участка с повреждением

Модели участков будут описываться двумя матрицами: матрицей продольного сопротивления для обрыва и матрицей поперечной проводимости для замыканий на землю. Данные матрицы будут иметь размерность 4×4 .

Вид матриц с обрывом и замыканием на землю фазы А:

$$Z_d = \begin{bmatrix} 1 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad Y_{d_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 \cdot 10^{-6} & 0 & -1 \cdot 10^{-6} \\ 0 & 0 & 1 \cdot 10^{-6} & -1 \cdot 10^{-6} \\ -1 & -1 \cdot 10^{-6} & -1 \cdot 10^{-6} & 1 \end{bmatrix}.$$

Обрыв моделируется введение сопротивления порядка 10^6 Ом, связь между проводами, а так же проводами и землей моделируется незначительной проводимостью 10^{-6} Сименс.

Параметры $2K$ -полюсника места обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя имеют вид:

$$A_d = E + ZY_{d_2}; \quad B_d = Z_d; \quad C_d = Y_{d_2}; \quad D_d = E.$$

Используя описанную методику и разработанные модели, на кафедре электроснабжения Костромской ГСХА был проведен анализ режима обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны источника. Исследовалось влияние на значение напряжения нулевой последовательности протяженности аварийной линии, суммарной длины линий, отходящих от одной питающей подстанции и значения переходного сопротивления в месте замыкания. Как показали полученные данные, режим обрыва фазного провода с замыканием на

землю со стороны источника по своим параметрам мало отличается от однофазного замыкания на землю. Поэтому разработки новых или специальной настройки существующих средств сигнализации не требуется. Устройство контроля состояния изоляции должно исправно срабатывать при контакте фазного провода с землей.

В третьей главе «Выявление режима обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя по токам и напряжениям на питающей подстанции» представлены результаты исследования зависимости значения напряжения и тока нулевой последовательности от протяженности аварийной линии Ld , суммарной длины смежных линий Ls , значения переходного сопротивления в месте замыкания Zz и сопротивления потребительского трансформатора Zt .

Как показали исследования, наибольшее влияние на значение напряжения нулевой последовательности оказывает значения Zz и Ls . Значение переходного сопротивления в значительной мере влияет как на значение $3U_0$ на шинах трансформатора, так и на распределение токов и напряжений в поврежденной линии. Увеличение переходного сопротивления Zz снижает значение тока однофазного ЗЗ и значение $3U_0$, что негативно сказывается на работе защиты, реагирующей на значения данных величин. Для $3U_0$ значение может снижаться до 34,4 В вместо 50 В при металлическом замыкании.

Значение тока ЗЗ поврежденной фазы равно сумме токов в четвертом проводнике (земле), что было предположено теоретически, и что показывает протекание тока ЗЗ через емкостные проводимости между фазными проводами и землей. Ток ЗЗ является суммой токов нулевой последовательности всех фаз $3I_0$. При рассмотрении линии без ответвлений длиной до 20 км с обрывом и ЗЗ через переходное сопротивление значения тока нулевой последовательности малы (сотые доли ампера) вследствие незначительной емкостной проводимости фазных проводов относительно земли. При подключении смежных линий к шинам питающего трансформатора ток через поврежденную фазу потребительского трансформатора увеличивается, и при малом коэффициенте загрузки потребительского трансформатора может достигать значений тока в исправных фазах.

Влияние сопротивления потребительского трансформатора Zt на значения токов и напряжений нулевой последовательности аналогично влиянию Zz . В режиме обрыва с ЗЗ со стороны потребителя переходное сопротивление замыкания и сопротивление нагрузки оказываются включенными последовательно, и их влияние на параметры аварийного режима идентично. При изменении Zt от 1 до 4 кОм при длине поврежденной линии Ld в 20 км, суммарной длине линий Ls 100 км и металлическом замыкании на землю в месте повреждения значение $3U_0$ меняется в пределах от 40,3 до 11,89 В.

Влияние удаленности места аварии от шин питающего трансформатора на значения токов и напряжений в сети незначительное. При изменении длины Ld от 0,001 до 20 км значение $3U_0$ меняется в пределах 5 В, что составляет 10% от максимального значения, и не влияет на чувствительность сигнализации ЗЗ.

При увеличении Ld растет значение тока нулевой последовательности, а, следовательно, и тока поврежденной фазы потребительского трансформатора.

Значение суммарной длины Ls оказывает значительное влияние на параметры режима однофазного ЗЗ. При этом напряжение нулевой последовательности снижается, как и при увеличении переходного сопротивления, а значение тока наоборот увеличивается. Отсюда следует, что возможен режим, при котором сигнализация ЗЗ нечувствительна к параметрам аварийного режима. При изменении суммарной длины линий от 20 до 100 км значение $3U_0$ находится в пределах 48,42...23,18 В.

Каждый параметр в отдельности не выводит значение $3U_0$ из зоны чувствительности сигнализации, но можно предположить, что их взаимное влияние приведет к такому случаю.

В случае установки кабельной вставки на выходе из распределительного устройства на каждый фидер устанавливается комплект токовой защиты нулевой последовательности, чувствительность которой с увеличением суммарной длины линий растет. На значение тока $3I_0$ оказывает сильное влияние значение Zz и Zt . При малом коэффициенте загрузки потребительского трансформатора токовая защита нулевой последовательности в режиме обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя окажется нечувствительной. По исследованиям ученых из Новосибирского ГТУ ток срабатывания в первичной цепи самого чувствительного современного реле (типа Орион-РТЗ) с кабельным трансформатором тока (типа ТЗЛМ) составляет 0,68 А. Таким образом, в зону нечувствительности данного устройства попадают все линии подстанций, у которых Ls менее 60 км в режиме с Zz от 1 кОм и выше. В случае низкой загрузки потребительского трансформатора даже при длине линий свыше 100 км и металлическом ОЗЗ токовая защита остается нечувствительной.

С помощью метода регрессионного анализа была получена зависимость значения напряжения нулевой последовательности от сопротивления обмоток потребительского трансформатора, длины поврежденного участка, значения переходного сопротивления в месте замыкания на землю, суммарной длины отходящих линий от распределительной подстанции в режиме обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя. Данную зависимость представим в виде формулы:

$$3U_0(Zt, Ld, Zz, Ls) = 55,2093 - 0,0014e^{Zt} - 0,11224e^{Ld} - 0,00074e^{Zz} - 0,08276e^{Ls}, \quad (7)$$

где Zt , Zz , Ls и Ld – значения факторов в абсолютном виде.

Выбор формулы в виде суммы экспоненциальных элементов обусловлен тем, что данный вид полинома обеспечивает необходимую степень точности в 95%. Другие виды полиномов заданной степени точности не обеспечивают.

Анализируя приведенную формулу (7) и графики сечений многомерной поверхности (рис. 6), можно видеть, что в режиме обрыва с однофазным ЗЗ со стороны потребителя устройство контроля целостности изоляции имеет достаточную чувствительность только при сопротивлении нагрузки потребительского трансформатора ниже 2 кОм, переходного сопротивления ниже 1 кОм и при суммарной длине линий менее 60 км.

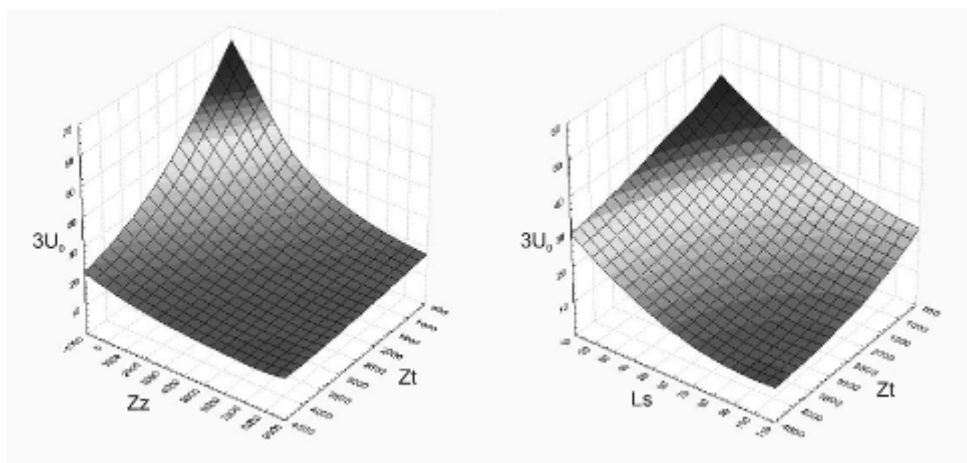


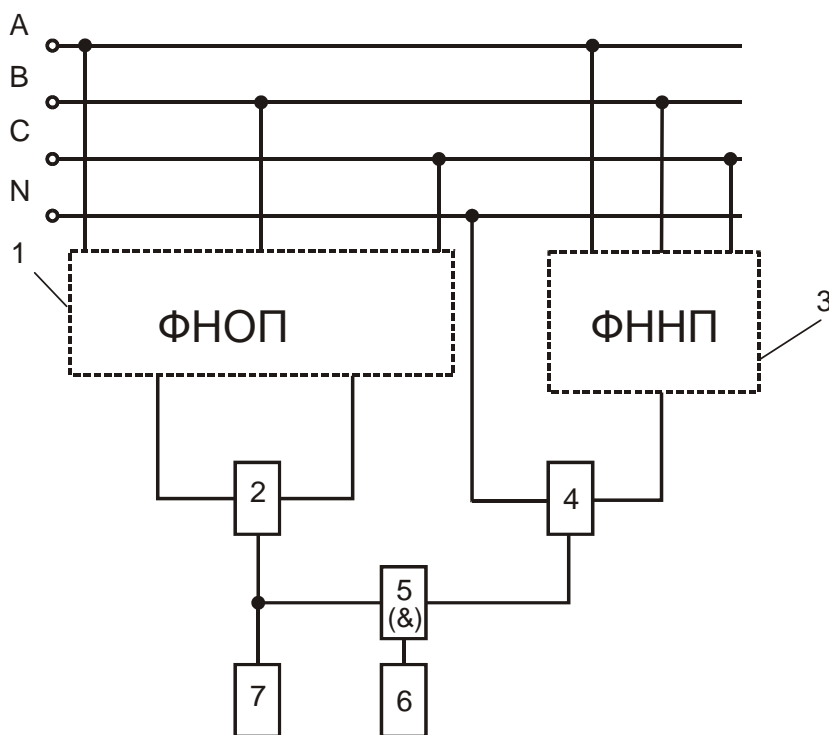
Рисунок 6 — Изменение значения $3U_0$ на шинах питающей подстанции в зависимости от сопротивления потребительского трансформатора, значения переходного сопротивления суммарной длины линий, отходящих от шин.

Токовая защита может распознать данный аварийный режим при суммарной длине линий свыше 60 км, переходном сопротивлении до 1 кОм и сопротивлении трансформатора около 1 кОм.

Таким образом, существующие на данный момент устройства сигнализации и защиты от замыканий на землю не распознают аварийный режим обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя в сельских сетях с приведенными параметрами.

В четвертой главе «Средства обнаружения обрыва проводов» предлагается использовать устройство для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ, работа которого основана на принципе анализа напряжений обратной и нулевой последовательности в сети 0,38 кВ.

Режим обрыва фазного провода в сети обнаруживается как фильтрами нулевой, так и фильтрами обратной последовательности. Действие предлагаемого устройства основано на том, что фильтр напряжения нулевой последовательности (ФННП) реагирует только на обрыв в сети 0,38 кВ и не реагирует на обрыв в сети 10 кВ, а фильтр обратной последовательности (ФНОП) реагирует на обрывы фазных проводов как в сети 0,38 кВ так и в сети 10 кВ. Установленное у потребителя устройство позволяет однозначно оценить место обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ. При обнаружении обрыва в сети 0,38 кВ энергетик, например птицефабрики, самостоятельно отыскивает повреждение. При обнаружении обрыва в сети 10 кВ энергетик сообщает об аварии электросетевому предприятию, которое приступает к поиску обрыва.



На основе различия в работе фильтров разработана схема устройства, на которую получен патент РФ на полезную модель RU 94077 (рис.7).

Рисунок 7 — Схема предлагаемого устройства для оценки места обрыва фазного провода

где 1 — ФНОП; 2 — пороговый орган ФНОП; 3 — ФННП; 4 — пороговый орган ФННП; 5 — логический элемент «И»; 6 — орган сигнализации срабатывания обоих фильтров; 7 — орган

сигнализации срабатывания ФНОП.

В ходе анализа влияния различных факторов на значения напряжения нулевой последовательности был получен ряд значений координат вектора напряжения $3U_0$ для линии длиной 20 км с повреждением посередине линии и сопротивлением нагрузки 2 кОм. На рисунке 8 представлены диаграммы положения конца вектора нулевой последовательности при изменении суммарной длины линий и переходного сопротивления в месте замыкания на землю.

На диаграммах можно видеть, что положение конца вектора $3U_0$ для одной фазы при простом замыкании на землю и обрыве с замыканием со стороны потребителя лежат в разных полуплоскостях. Так же можно видеть, что режимы замыкания на землю одной фазы и обрыва с замыканием на землю другой отличаются положением конца вектора $3U_0$, хоть и лежат в одной полуплоскости.

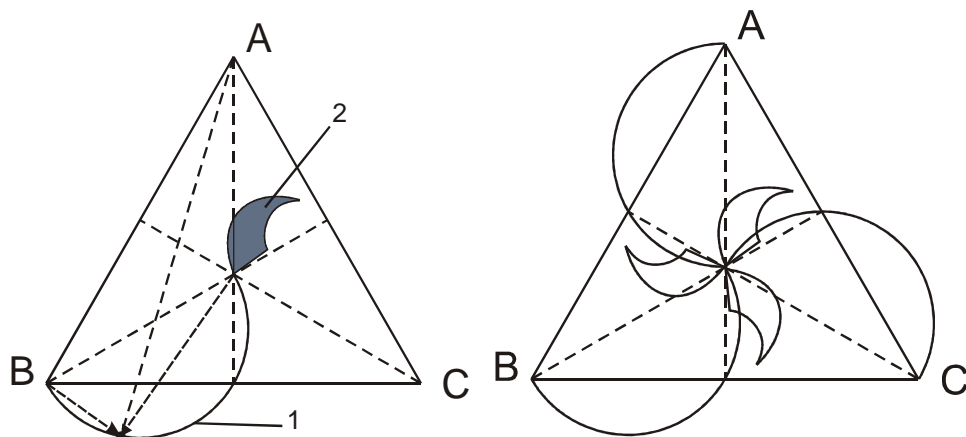


Рисунок 8 — Годографы векторов фазных напряжений и $3U_0$

где 1 – годограф вектора $3U_0$ для режимов замыкания на землю фазы В; 2 – годограф вектора $3U_0$ для режимов обрыва фазного провода с замыканием на землю фазы В;

Анализируя векторные диаграммы напряжений на питающей подстанции можно однозначно не только вид режима, но и поврежденную фазу. Анализ векторной диаграммы следует производить следующим образом. Измеряя фазные напряжения следует определить фазу с максимальным и минимальным его значением. Далее следует определить ход чередования фаз, при движении от фазы с минимальным напряжением к фазе с максимальным. Если чередование фаз обратное, то это режим замыкания на землю через переходное сопротивление без обрыва. В случае прямого чередования необходимо проверить, попадает ли конец вектора напряжения нулевой последовательности в область значений для режима обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя (см. рис. 8).

Исследуя подобным образом векторные диаграммы можно определить не только вид аварийного режима, но и поврежденную фазу. Так действительно, при обратном чередовании значений фазных напряжений поврежденная фаза будет иметь наименьшее напряжение. При прямом чередовании фаз и попадании конца вектора в область режима обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя поврежденная фаза будет иметь наибольшее напряжение, при непопадании – среднее.

Принцип определения направления вектора $3U_0$ может быть положен в основу работы прибора, анализирующего соотношения фазных напряжений в начале линии на распределительной подстанции и определяющего режим обрыва с замыканием на землю со стороны потребителя в случае несрабатывания основных средств сигнализации и защиты. Данный алгоритм может быть реализован, например, с помощью микропроцессорных устройств.

В пятой главе «Экономическое обоснование применения устройства для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ» представлены экономические расчеты, показывающие, что применение разработанных устройств сокращает продолжительность отыскания повреждения, позволяет уменьшить ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям и снижения ее качества. Внедрение устройства для оценки места обрыва фазного провода позволит получить годовую экономию эксплуатационных затрат в размере 992,88 руб. при сроке окупаемости капиталовложений в 0,6 года для линии длиной 15 км.

Основные выводы по работе:

1. Проведенный анализ методик расчета аварийных режимов сетей 10 кВ с изолированной нейтралью показал, что сложные аварийные режимы таких сетей не рассматривались.

2. Разработаны математические модели линий электропередачи, нагрузки, трансформатора 10/35 кВ со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник», аварийного участка линии электропередачи с учетом влияния земли, как четвертого проводника, позволяющие рассчитывать значения токов и напряжений при обрыве с замыканием на землю, в том числе тока замыкания на землю.

3. Усовершенствованная методика расчета режимов сетей 10 кВ с изолированной нейтралью позволяет определять значение тока и напряжения в различных сложных аварийных режимах, в том числе при обрыве фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя. Так же позволяет, при необходимости, исключить из расчета сложные модели трансформаторов 35/10 кВ.

4. По расчетным данным получено уравнение регрессии напряжения нулевой последовательности для сети 10 кВ в режиме обрыва с замыканием на землю. Из уравнения следует, что совместное влияние факторов аварийного режима приводит к снижению значения $3U_0$ в режиме с замыканием на землю вплоть до уровня ниже порога срабатывания устройства контроля целостности изоляции. На основе расчетных данных с использованием математического моделирования построены графики зависимости значения и направления вектора напряжения нулевой последовательности от различных параметров сети. Даны рекомендации по настройке устройств сигнализации.

5. Для анализа аварийных режимов в сетях 10 кВ с изолированной нейтралью методом фазных координат разработана библиотека математических моделей элементов сети 10 кВ с изолированной нейтралью в пакете Simulink математического комплекса MATLAB, позволяющая наглядно представлять структуру сети и определять параметры сложных аварийных режимов в любой ее точке.

6. Разработанное и защищенное патентом на полезную модель устройство для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ устанавливается у потребителя и позволяет снизить ущерб от недоотпуска электроэнергии путем ускорения отыскания места повреждения.

7. Разработан алгоритм фиксации на питающей подстанции режима обрыва фазного провода с замыканием на землю со стороны потребителя путем сравнения фазных напряжений и напряжения нулевой, который может быть реализован с помощью современных микропроцессорных устройств.

8. Устройство для оценки места обрыва фазного провода в сети 0,38 кВ или 10 кВ прошло лабораторные испытания, показавшие его эффективность. Устройство внедрено на предприятии СПК «Родина» Красносельского района Костромской области. Внедрение устройства для оценки места обрыва фазного провода позволит получить годовую экономию эксплуатационных затрат в размере 992,88 руб. при сроке окупаемости капиталовложений в 0,6 года для линии длиной 15 км.

Основные результаты исследования изложены в следующих публикациях:

1. Клочков А.Н. Методика расчета сложных режимов в сетях с изолированной нейтралью [Текст] / Н. М. Попов, А. Н. Клочков// *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* – 2010. – №11. – С.52–57

2. Клочков А.Н. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода [Текст] / А. Н. Клочков// *Вестник КрасГАУ.* – 2011. – №1. – С.221–223.

3. Клочков А.Н. Обрыв фазного провода в сети 10 кВ с замыканием на землю со стороны потребителя [Текст] / Н. М. Попов, А. Н. Клочков // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2011. – №2. – С.8–11.

4. Клочков А.Н. Анализ обрывов фазных проводов в сети 10 кВ [Текст] / А.Н. Клочков, Н.М. Попов // *Сборник материалов III Международной выставки – Интернет–конференции / ОрелГАУ*. – 2009. – Часть 1. Энергообеспечение и строительство. – С. 46–51.

5. Пат. RU 94077 U1 РФ, МПК H02H 99/00. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывами фазных проводов [Текст] / Н.М.Попов, А.Н.Клочков (РФ) заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Костромская государственная сельскохозяйственная академия. — №2009148481/22; заявл.25.12.09; опубл. 10.05.10 Бюл. № 13.— 5с.

6. Клочков А.Н. Влияние переходного сопротивления на работу трансформатора напряжения при обрыве с замыканием на землю [Текст] / А.Н. Клочков // *Актуальные проблемы в агропромышленном комплексе: материалы 61-й международной научно-практической конференции: в 3 т.*— Кострома: КГСХА, 2010. – С.172–174.

7. Клочков А.Н. Сложные аварийные режимы в сетях 10 кВ [Текст] / А.Н.Клочков, Н.М.Попов // *Костромская ГСХА.*— Кострома, 2010.—80 с.: ил. — Библиогр.: 28 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ (№533 – В2010 от 22.09.10).