

На правах рукописи



СОЛДАТОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

Совершенствование методов расчета и обнаружения
аварийных режимов сельских электрических сетей 10 кВ
по наведенным напряжениям

05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»
(ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Попов Николай Малафеевич

Официальные оппоненты: **Лещинская Тамара Борисовна**, доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, кафедра электроснабжения и электротехники им. академика И.А.Будзко, профессор
Антонов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, заведующий лабораторией электроснабжения

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный заочный университет» (ФГБОУ ВО РГАЗУ)

Защита состоится «08» декабря 2015 года в 09 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 006.037.01 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, д.2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ВИЭСХ и на сайте:
<http://www.viesh.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Некрасов Алексей Иосифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Расчет и обнаружение аварийных режимов (АР) линий электропередачи 6-10 кВ является актуальной задачей, так как эти линии составляют основу распределительных электрических сетей. Длина линий напряжением 6-10 кВ достигает 1,1 млн. км, что составляет 47% от длины всех линий класса 0,38-220 кВ. При этом половина линий отработала свой ресурс. На сегодняшний день разработано много устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) для распределительных сетей. Кроме задач РЗАиА остро стоит проблема обнаружения места повреждения (ОМП).

В основном сети 10 кВ представляют собой сельские воздушные линии, которые питают сельскохозяйственные потребители. Городские сети 10 кВ в основном выполнены как кабельные линии. Поэтому разработка методов обнаружения АР именно в сельских сетях имеет важное значение. Сокращение времени обнаружения и устранения АР повышает эффективность работы этих сетей особенно в труднодоступной сельской местности (леса, овраги, болотистые участки и т.п.) и при плохой погоде, когда необходим обход линии (дождь, снег, грязь, сугробы).

Наиболее сложными для определения являются режимы с замыканиями на землю и в частности режим однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Специфика режима работы нейтрали и конструктивного исполнения линий электропередачи 10 кВ не позволяют своевременно выявить и отключить ОЗЗ с помощью средств РЗА. Методы и средства ОМП делятся на дистанционные и топографические, их анализ дан в 1 главе диссертации. В основном все методы требуют отключения линий от сети, что создает известные трудности. Кроме того эти методы используют напряжения и токи в самих линиях 6-10-35 кВ. Для этого измерительные приборы и различные устройства подключаются через трансформаторы напряжения (ТН) и трансформаторы тока (ТТ). Установленные ТН и ТТ в сетях 10 кВ в большинстве своем устарели и имеют малый класс точности. Для повышения точности необходимо заменить существующие ТН и ТТ на более современные. Однако, это ведет к дополнительным затратам, которые делают не эффективными с экономической точки зрения даже новые методы ОМП.

Данная диссертационная работа посвящена совершенствованию методов расчета и обнаружения АР в сетях 10 кВ. Для расчета АР использованы модели всех элементов сети в фазных координатах (ФК). Для обнаружения АР развивается метод сущность которого состоит в том, что параллельно фазам А, В, С линии 10 кВ размещают один или несколько проводников малой длины. Такое устройство будем называть антенной, а проводники – стержнями антенны. На этих антеннах наводятся наведенные напряжения (НН). Ранее проводники антенн размещались так, чтобы НН в нормальном режиме было близко к нулю, а при ОЗЗ НН составляли бы значительную величину. Т.е. стремились к тому, чтобы антенна обладала свойством фильтра нулевой последовательности. Это достигалось размещением стержней в геометрическом центре тяжести треугольника, образованного фазами А, В, С линии 10 кВ. Основные положения данного метода отражены в научных работах и авторских свидетельствах на изобретения Будзко И.А., Сагутдинова Р.Ш., Жаркова В.Я., Селивахина А.И.. Обзор этих работ дан в диссертации.

В данной работе исследованы одностержневые и многостержневые антенны с размещением стержней, обеспечивающим отличие НН в нормальном режиме от НН в различных АР. Причем, рассмотрены все возможные АР, а не только режимы с ОЗЗ.

Существующие на сегодняшний день современные универсальные микропроцессорные устройства ОМП без отключения линий для сетей 6-750 кВ используют соотношения между токами и напряжениями трех симметричных составляющих. В сетях с глухозаземленной нейтралью класса 110 кВ и выше эти устройства хорошо себя зарекомендовали. В распределительных сетях с изолированной нейтралью они не так эффективны из-за своей относительно высокой стоимости. В этих

сетях они не определяют ОЗЗ и двойные замыкания на землю. Кроме того, эти приборы подключаются через ТН и ТТ, которые снижают точность ОМП. Таким образом, для сетей с изолированной нейтралью необходимо разрабатывать новые дистанционные методы ОМП без отключения линий.

Для расчетов аварийных режимов фидеров 10 кВ, а также наведенных напряжений от них в работе применен современный метод фазных координат. На сегодняшний день этот метод преимущественно применяется в сетях класса 110 кВ и выше. В распределительных сетях 6-10-35 кВ этот метод применяется пока ограничено.

Исследования по применению метода ФК выполнены учеными: Ульяновым С.А., Мельниковым Н.А., Лосевым С.Б., Черниным А.Б., Федосеевым А.М., Фабрикантом В.А., Гусейновым А.М., Берманом А.П. и др. Большой вклад в решение вопросов по ОМП в электрических сетях сделали ученые: Айзенфельд А.И., Аржанников Е.А., Беляков Ю.С., Кудрявцев А.А., Кузнецов А.П., Лямец Ю.А., Шабад М.А., Шалыт Г.М. и др.

Применению метода ФК в распределительных сетях посвящены работы ученых Костромской ГСХА: Попова Н.М., Солдатова В.А., Олина Д.М., Ключкова А.Н., Баранова А.А., Климова Н.А.. В работах Попова Н.М. разработаны модели элементов распределительных электрических сетей (линий, трансформаторов, нагрузок, блока несимметрии) в фазных координатах. Методы и средства обнаружения АР не рассматривались. В работах Баранова А.А. и Климова Н.А. усовершенствованы модели для сетей 10 и 35 кВ и усовершенствованы методы обнаружения АР на основе соотношений для реальных токов и напряжений в начале фидеров.

Целью работы является совершенствование существующих методов расчета и определения вида и места возникновения АР в сетях 10 кВ. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор и анализ существующих методов расчета и средств обнаружения АР в распределительных электрических сетях.

2. Усовершенствовать методы, алгоритм и программу расчета аварийных режимов фидеров 10 кВ, а также НН на коротких проводниках (антеннах) параллельных линии, на основе которых определить степень влияния на НН основных параметров фидеров и самих антенн.

3. Провести исследование возможности определения вида возникшего АР в фидере 10 кВ по интервалам НН на антенне, а также возможности определения места возникшего АР по интерполяционным зависимостям НН от места возникновения этих режимов вдоль длины линии с оценкой точности определения. Выявить степень влияния переходного сопротивления в месте замыкания на точность определения вида и места АР и возможность определения аварийных режимов в разветвленных фидерах.

4. Исследовать эффективность применения многостержневых антенн для определения вида и места АР фидеров 10 кВ. Рассмотреть антенны с максимальным сближением стержней и фаз линии.

5. Провести эксперименты и оценить технико-экономическую эффективность усовершенствованного метода ОМП.

Объект исследования. Объектом исследования в настоящей работе является электрическая сеть напряжением 10 кВ и ее аварийные режимы.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы расчета и определения вида и места АР сетей 10 кВ по наведенным напряжениям на специальных антеннах.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы: - математического и компьютерного моделирования электрической сети 10 кВ на основе метода фазных координат; - математические методы с использованием матричной

теории электрических сетей и интерполяционных полиномов; - элементы теоретических основ электротехники; - методики определения технико-экономической эффективности работы линий.

Научная новизна работы.

1. Усовершенствованы методы расчета аварийных режимов фидеров 10 кВ и наведенных напряжений на многостержневых антеннах в фазных координатах.

2. Установлено, что НН на антенне мало зависит от чередования фаз линии и длины проводников при их разных расположениях. Выявлено, что наибольшие НН возникают во всех АР с замыканиями на землю, а наибольшее влияние на НН оказывает несимметрия фазных напряжений и их распределение вдоль длины линии 10 кВ.

3. Показана возможность определения вида АР по интервалам НН на антенне с учетом точки возникновения повреждения, а также определения места АР по интерполяционным зависимостям НН от места возникновения аварии вдоль длины линии, как в магистральных, так и в разветвленных фидерах при любой величине переходного сопротивления в месте замыкания. Получено аналитическое выражение для расстояния до места аварии.

4. Установлено, что в многопроводных антеннах стержни можно размещать произвольно, например: по окружности, горизонтально, вертикально друг под другом, по треугольнику – добиваясь практически одинакового эффекта по величине НН и полученной мощности антенны. Наибольшей мощности можно достичь, подвешивая стержни на изоляторах, крепящихся непосредственно к фазам линии.

Реализация результатов исследований. Программа расчета АР и НН, а также результаты проведенных в диссертации исследований по определению вида и места АР в фидерах 10 кВ внедрены в филиале ОАО «МРСК Центра» – «Костромаэнерго». Программа расчета и полученные результаты используются в научно-исследовательской работе и учебном процессе ФГБОУ ВО Костромской ГСХА при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованы методы расчета аварийных несимметричных режимов фидеров 10 кВ и наведенных напряжений на специальных антеннах в фазных координатах, позволяющие вести расчеты токов и напряжений в фидерах 10 кВ при любой несимметрии, а так же наведенных напряжений при любом числе, любой длине и месте расположения стержней антенны.

2. На основе результатов исследований показано, что НН мало зависят от нагрузки и чередования фаз линии 10 кВ, от переходного сопротивления в месте замыкания, от длины проводников антенны и в наибольшей степени зависят от несимметрии фазных напряжений и их распределения вдоль длины линии. Это позволяет выбирать нужное расположение проводников антенны и использовать выявленные зависимости для определения вида и места аварийных режимов.

3. Установлена возможность определения вида аварийных режимов по интервалам наведенных напряжений на проводниках антенны, а также возможность определения места АР по интерполяционным зависимостям этих НН от точки повреждения вдоль длины линии с использованием полученных аналитических выражений.

4. По результатам исследований выявлена возможность ОМП в разветвленных фидерах по наибольшим значениям НН на антеннах, установленных перед каждым потребительским трансформатором 10/0,4 кВ.

5. Выявлено, что многопроводные антенны могут обеспечивать одинаковый уровень НН при различном расположении их стержней: по окружности, по треугольнику, по горизонтали, по вертикали с одной и с двух сторон от линии, а также

при расположении с максимальным сближением стержней антенны и фаз линии. Это позволяет выбирать расположение стержней антенны не только по уровню НН, но и с точки зрения безопасности и надежности их эксплуатации.

Достоверность исследований обусловлена применением строгих математических преобразований с использованием матричной теории электрических сетей (фазных координат) с оценкой погрешности определения места АР, проведенным экспериментом и оценкой технико-экономической эффективности.

Практическая ценность. Усовершенствованы методы расчета АР фидеров 10 кВ и НН на антеннах реализованы в программе расчета на ЭВМ. Усовершенствованные методы определения вида и места АР в фидерах 10 кВ позволяют повысить эффективность ОМП в этих сетях. Рассмотренные новые расположения стержней многопроводных антенн позволяют повысить их удобство монтажа и эксплуатации. Разработана модель для измерения наведенных напряжений на антеннах под линиями электропередач. Разработанная программа и результаты расчета АР прошли проверку в филиале ОАО «МРСК Центра» – «Костромаэнерго», что подтверждено соответствующим актом внедрения. Дана оценка технико-экономической эффективности предлагаемого усовершенствованного метода ОМП в фидерах 10 кВ.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на ежегодных международных научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО Костромской ГСХА в 2012, 2013, 2014 годах, а также на IV и V международных научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО Саратовский ГАУ в 2013 и 2014 годах

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 научная печатная работа, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент на полезную модель.

Структура диссертации и ее объем. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов по каждой главе, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем составляет 200 страниц, в том числе 198 страницы основного текста, 84 рисунка, 41 таблиц, списка литературы из 215 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, определены цель и основные задачи исследования, отмечена научная новизна работы и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Методы определения места повреждения и математические модели электрических сетей 6-35 кВ» приведен обзор методов и средств обнаружения мест повреждений, а также рассмотрены модели всех видов устройств, включенных вдоль фидера 10 кВ в ФК в матричном виде.

Методы и средства ОМП делятся на дистанционные и топографические. Приборы, работающие на основе дистанционного метода, устанавливаются на подстанциях и указывают расстояние до повреждения. Топографический метод используется для средств обнаружения места повреждения, находящихся в распоряжении поисковой бригады, обходящей поврежденную линию электропередачи. Дистанционные методы: стоячих волн, импульсные (локационные, волновые), по параметрам аварийного режима (односторонние, двухсторонние), емкостные, петлевые. Топографические: индукционные, электромеханические, акустические, потенциальные. В основном все методы требуют отключения линий от сети, что снижает их эффективность. Для реализации этих методов используют напряжения и токи в самих линиях 6-10 кВ, которые можно измерить только с помощью трансформаторов напряжения (ТН) и трансформаторов тока (ТТ). Это также снижает точность

определения вида и места АР, а следовательно и эффективность соответствующих методов. Все это делает актуальной задачу ОМП с возможностью ее реализации без отключения линии и без применения ТН и ТТ. Именно такой метод развивается в данной работе.

Для всех дистанционных методов ОМП надо знать напряжения или токи, или то и другое в самом фидере 10 кВ. Для их расчета в работе использован метод фазных координат. Отмечено, что для расчета методом ФК используется H -форма и Y -форма $2k$ -полюсников всех элементов сети. H -форма связывает напряжения и токи в начале с напряжениями и токами в конце $2k$ -полюсника. Y -форма связывает токи в начале и в конце с напряжениями в начале и в конце $2k$ -полюсника. Между этими формами существует аналитическая связь.

$$\begin{bmatrix} U_H \\ I_H \end{bmatrix} = [H] \cdot \begin{bmatrix} U_K \\ I_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_K \\ I_K \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_H \\ I_K \end{bmatrix} = [Y] \cdot \begin{bmatrix} U_H \\ U_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_a & Y_b \\ Y_c & Y_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_H \\ U_K \end{bmatrix} \quad (1)$$

Матрица H называется матрицей передачи данного устройства, а матрица Y называется матрицей узловых проводимостей. Для моделирования устройств, включенных в сеть 10 кВ, необходимо знать матрицы передачи каждого из этих устройств. В работе описан расчет матриц передачи всех элементов фидера 10 кВ: участков линии; питающего трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – треугольник»; потребительского трансформатора 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нулем»; повреждений, происходящих в линии (блок несимметрии); разветвлений (или отпайки); нагрузки. Эти матрицы передачи имеют следующий вид.

Для участков линий:

$$A_L = E + Z \cdot Y \quad B_L = Z \quad C_L = 2 \cdot Y + Y \cdot Z \cdot Y \quad D_L = E + Y \cdot Z$$

Для трансформаторов:

$$Y_u = M \cdot Z_{\hat{A}}^{-1} \cdot M^T = \begin{bmatrix} Y_{\hat{u}11} & Y_{\hat{u}12} \\ Y_{\hat{u}21} & Y_{\hat{u}22} \end{bmatrix}$$

$$A_T = -Y_{\hat{u}21}^{-1} \cdot Y_{\hat{u}22} \quad B_T = -Y_{\hat{u}21}^{-1} \quad C_T = Y_{\hat{u}12} - Y_{\hat{u}11} \cdot Y_{\hat{u}21}^{-1} \cdot Y_{\hat{u}22} \quad D_T = -Y_{\hat{u}11} \cdot Y_{\hat{u}21}^{-1}$$

Для нагрузки:

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

Для блока несимметрии:

$$A_N = E + Z_{i\hat{a}\hat{d}} \cdot Y_{KZ2} \quad B_N = Z_{i\hat{a}\hat{d}} \quad C_N = Y_{KZ1} + Y_{KZ2} + Y_{KZ1} \cdot Z_{i\hat{a}\hat{d}} \cdot Y_{KZ2} \quad D_N = E + Y_{KZ1} \cdot Z_{i\hat{a}\hat{d}}$$

Здесь матрицы: E - единичная; Z - продольных сопротивлений; Y - поперечных проводимостей; M - соединений; Z_b - сопротивлений ветвей; Y_u - узловых проводимостей; $Z_{обр}$ - сопротивлений обрывов; Y_{KZ1} , Y_{KZ2} - проводимостей КЗ до и после обрыва.

Расчет АР сети 10 кВ можно вести или на основе матрицы узловых проводимостей всей сети, или на основе эквивалентной матрицы передачи всей сети H_{Σ} , которая рассчитывается как произведение матриц передачи H_i всех устройств сети.

$$H_{\Sigma} = \begin{bmatrix} A_{\Sigma} & B_{\Sigma} \\ C_{\Sigma} & D_{\Sigma} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{N_y} (H_i) = \prod_{i=1}^{N_y} \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Во второй главе «Методы расчета аварийных режимов фидеров 10 кВ и наведенных напряжений на параллельных проводниках» показано, что для расчета НН необходимо сначала рассчитать сам аварийный режим фидера 10 кВ, а затем напряжения по концам первого участка линии параллельно которому будут располагаться проводники антенны. Для расчета АР усовершенствован метод, основанный на следующей расчетной схеме:

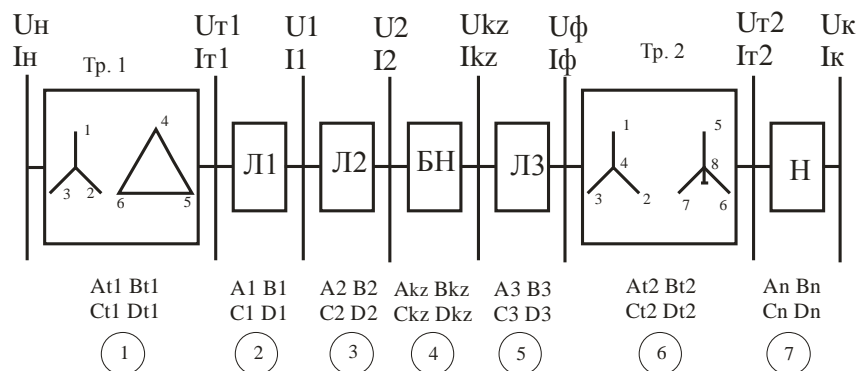


Рисунок 1. Расчетная модель фидера 10 кВ

В расчетной схеме обозначено: 1 – питающий трансформатор (Тр. 1) со схемой соединения обмоток «звезда – треугольник» (матрица передачи $A_{t1}, B_{t1}, C_{t1}, D_{t1}$); 2 – первый участок линии Л1 (матрица передачи A_1, B_1, C_1, D_1); 3 – второй участок линии Л2 (матрица передачи A_2, B_2, C_2, D_2); 4 – блок несимметрии БН (матрица передачи $A_{kz}, B_{kz}, C_{kz}, D_{kz}$); 5 – третий участок линии Л3 (матрица передачи A_3, B_3, C_3, D_3); 6 – потребительский трансформатор 10/0,4 кВ (Тр. 2) со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нулем» (матрица передачи $A_{t2}, B_{t2}, C_{t2}, D_{t2}$); 7 – устройства, включенные после выхода потребительского трансформатора 10/0,4 кВ и нагрузка H (матрица передачи A_n, B_n, C_n, D_n).

Уравнения вида (1) для каждого элемента расчетной схемы были разбиты на блоки относительно линии и параллельных проводников вида:

$$\begin{bmatrix} U_{н1} \\ U_{н2} \\ I_{н1} \\ I_{н2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} \\ A_{21} & A_{22} & B_{21} & B_{22} \\ C_{11} & C_{12} & D_{11} & D_{12} \\ C_{21} & C_{22} & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{к1} \\ U_{к2} \\ I_{к1} \\ I_{к2} \end{bmatrix}$$

Здесь параметры $A_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j}, D_{i,j}$ – являются блоками соответствующих матриц передачи линии 10 кВ и проводников антенны.

Затем в работе получены напряжения и токи во всех точках расчетной схемы согласно рисунку 1. Эти выражения имеют вид:

$$\begin{cases} U_i = A_i \cdot U_i \\ I_i = C_i \cdot U_i \end{cases} \quad (3)$$

В (3) обозначено: i – номер расчетной точки согласно рисунку 1; U_n – фазные напряжения в начале фидера; U_i, I_i – напряжения и токи в i -ой расчетной точке; A_i, C_i – сложные матричные выражения, зависящие от матриц передачи всех устройств фидера 10 кВ. Например, для начала первого участка линии, согласно рисунку 1 получено:

$$\begin{cases} U_{T1} = A_{82} \cdot A_{92}^{-1} \cdot U_n & A_{82} = A_{\gamma} \cdot A_{62} + B_{\gamma} \cdot C_{62} & A_{92} = A_{t1} \cdot A_{82} + B_{t1} \cdot C_{82} & C_{62} = C_{32} \cdot A_{421} + D_{32} \cdot C_{421} \\ I_{T1} = C_{82} \cdot A_{92}^{-1} \cdot U_n & C_{82} = C_{\gamma} \cdot A_{62} + D_{\gamma} \cdot C_{62} & A_{62} = A_{12} \cdot A_{421} + B_{12} \cdot C_{421} & A_{42} = -A_{n22}^{-1} \cdot A_{n21} \\ A_{421} = A_{n11} + A_{n12} \cdot A_{42} & C_{421} = C_{n11} + C_{n12} \cdot A_{42} & A_{12} = A_{t211} + B_{t212} \cdot C_{21} & B_{12} = B_{t211} + B_{t212} \cdot D_{21} \end{cases}$$

Проводники антенны располагаются параллельно фазам линии 10 кВ на первом расчетном участке линии. Условное расположение влияющей линии 10 кВ с напряжениями и токами в начале и в конце ($U_{н1}, I_{н1}, U_{к1}, I_{к1}$), а также параллельных проводников с напряжениями и токами в начале и в конце ($U_{н2}, I_{н2}, U_{к2}, I_{к2}$) показано на рисунке 2.

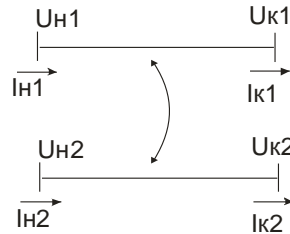


Рисунок 2. Условное расположение влияющей линии 10 кВ (индексы 1) и параллельных проводников (индексы 2)

Будем считать, что напряжения и токи по концам участка линии ($U_{н1}$, $I_{н1}$, $U_{к1}$, $I_{к1}$) найдены в соответствии с описанным выше методом. При этом, возможны 3 случая для параллельных проводников антенны: 1 - проводники отключены и разомкнуты по концам; 2 - проводники заземлены в конце и разомкнуты в начале; 3 - проводники заземлены в начале и разомкнуты в конце.

В работе найдены НН на проводниках антенны для всех этих трех случаев. При этом выражения для НН на проводниках антенны в начале $U_{н2}$ и в конце $U_{к2}$ имеют вид:

$$\begin{aligned} U_{i2} &= Ak1 \cdot U_{i1} + Ak2 \cdot U_{\xi1} \\ U_{к2} &= Ak3 \cdot U_{н1} + Ak4 \cdot U_{к1} \end{aligned} \quad (4)$$

При разомкнутых по концам проводниках антенны получено:

$$\begin{aligned} Ak1 &= AE2 - BE2 \cdot BE1^{-1} \cdot AE1 & Ak3 &= -C22^{-1} \cdot D21 \cdot BE1^{-1} \\ Ak2 &= BE2 \cdot BE1^{-1} & Ak4 &= -C22^{-1} \cdot C21 + C22^{-1} \cdot D21 \cdot BE1^{-1} \cdot AE1 \end{aligned}$$

В (4) обозначено: $U_{н1}$, $U_{к1}$ – напряжения по концам первого участка линии; $Ak1$, $Ak2$, $Ak3$, $Ak4$, $AE1$, $AE2$, $BE1$, $BE2$, $C21$, $C22$, $D21$ – матрицы зависящие от параметров линии 10 кВ и параметров проводников антенны. При этом число фаз линии и число параллельных проводников могут быть любыми. Так же может быть произвольной длина проводников. Однако, возможно применение проводников малой длины (нескольких метров). В этом случае можно использовать и другой метод расчета основанный на использовании системы емкостей фаз линии и проводников, представленный в диссертации.

Приведен обзор работ Будзко И.А. и его коллег. Они рассмотрели расположения стержней антенны, придающие ей свойство фильтра напряжения нулевой последовательности, когда наведенное напряжение будет пропорционально сумме напряжений на фазах линии $U_{нн} = k \cdot (U_a + U_b + U_c)$. Для этого необходимо размещать стержни так, чтобы геометрический центр тяжести фаз линии A , B , C совпадал с центром тяжести стержней антенны. Эти расположения представлены на рисунке 3, на котором отображено расположение одного стержня в центре (рисунок 3, а) и трех стержней, размещенных по окружности вписанной в треугольник A , B , C (рисунок 3, б) и по описанной окружности проходящей через фазы A , B , C (рисунок 3, в). Таким образом, НН на рассмотренных антеннах в нормальном режиме строго равно 0 и возникает, когда в сети появляется напряжение нулевой последовательности. В этих работах задача ОМП не ставилась. Эти исследования проводились в 1972-1978 годах. Затем исследования были приостановлены из-за трудности размещения стержней согласно рисунку 3 между фазами линии. Кроме того существующие тогда приборы измерения и индикации на высоком напряжении не позволяли эффективно измерить НН и передать его величину на расстояние. Сейчас развитие этого метода стало возможным благодаря появлению современных персональных компьютеров, средств измерения и устройств передачи данных. Кроме того, стержни антенн можно размещать практически в любых точках под линиями электропередачи обеспечивая необходимый уровень НН и требования по безопасности и удобству эксплуатации.

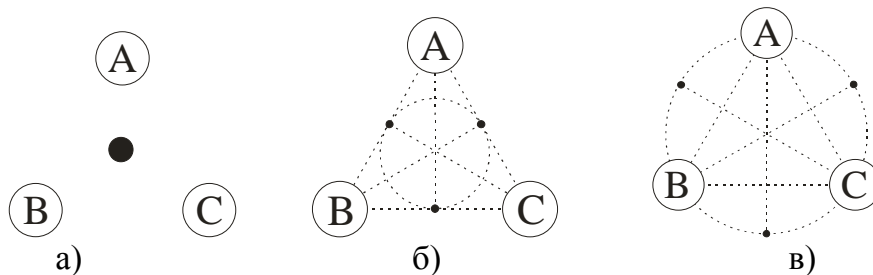


Рисунок 3. Стержни, размещенные в центре тяжести треугольника фаз А,В,С
 а) – один стержень, б) – три стержня по вписанной окружности, в) – три стержня по описанной окружности

В третьей главе «Исследование наведенных напряжений на проводнике параллельном линии электропередачи для определения аварийных режимов» исследованы НН при различной длине проводников.

Были рассчитаны следующие виды нормальных и аварийных режимов: нормальный режим; замыкание фазы А на землю (А-О); замыкание фазы В на землю (В-О); замыкание фазы С на землю (С-О), короткое замыкание между фазами (А-В); короткое замыкание между фазами (А-С); короткое замыкание между фазами (В-С); трехфазное короткое замыкание (А-В-С); двойное замыкание на землю фаз А и В (А-О, В-О); двойное замыкание на землю фаз А и С (А-О, С-О); двойное замыкание на землю фаз В и С (В-О, С-О); обрыв фазы А; обрыв фазы В; обрыв фазы С; одновременное замыкание на землю и обрыв фазы А (А-О+обр.А); одновременный обрыв и замыкание на землю фазы А (обр.А+А-О); одновременное замыкание на землю и обрыв фазы В (В-О+обр.В); одновременный обрыв и замыкание на землю фазы В (обр.В+В-О); одновременное замыкание на землю и обрыв фазы С (С-О+обр.С); одновременный обрыв и замыкание на землю фазы С (обр.С+С-О). Сначала длина проводника принималась равной 70 метров, что соответствует длине пролета линии 10 кВ. В этом случае проводник можно называть тросом. Были проведены расчеты: при различной нагрузке линии 10 кВ (ток нагрузки равен: 0, 50 и 100 ампер), при возникновении АР в начале, в середине, в конце и при различном чередовании фаз линии 10 кВ (А-В-С) и (В-А-С). Исследования показали, что при изменении этих параметров наибольшая разница НН наблюдается только при обрывах и двухфазных коротких замыканиях. В других режимах с замыканиями разница НН составляет не более 1,3 %. Кроме того, в режимах, где присутствуют замыкания на землю - отклонения НН при разной «фазировке фаз» практически нет. Влияние нагрузки также незначительное. Показано, что при отклонении фазных напряжений на $\pm 5\%$ от номинальных - НН строго пропорциональны фазным напряжениям т.е. НН также будут отклоняться не более чем, на $\pm 5\%$. Такие небольшие отклонения НН на проводнике позволяют выбрать однотипные сигнализирующие

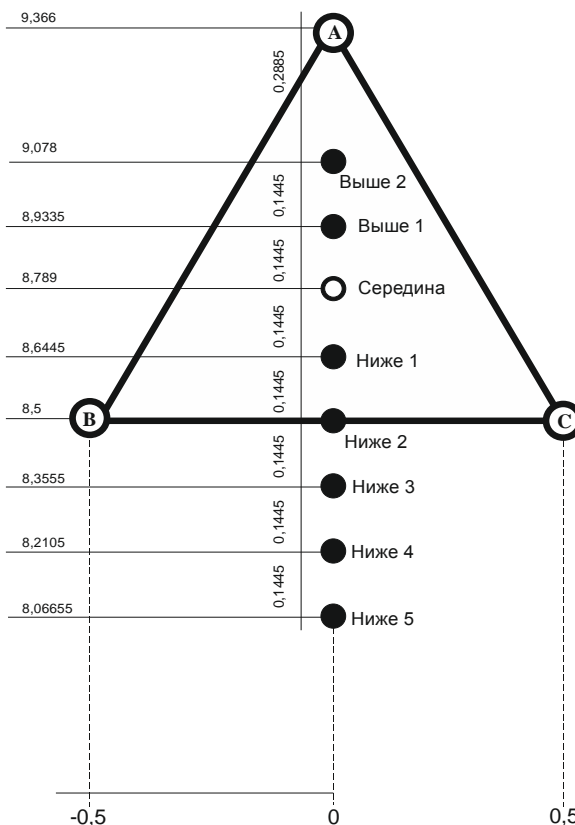


Рисунок 4. Расположение фаз (А,В,С) и проводника в различных точках вдоль вертикали

устройства для определения возникновения замыканий на землю при любой нагрузке, любом чередовании фаз и отклонении фазных напряжений в линии 10 кВ.

Далее были проведены исследования при различных точках расположения проводника вдоль вертикали, как показано на рисунке 4.

Исследования показали, что во всех рассмотренных точках отклонения НН (на холостом ходу) в АР от нормального режима имеют один и тот же порядок. Так, при проводнике в точке «ниже 2» отклонения НН от нормального режима составляют разные величины при разных режимах, где присутствуют замыкания:

- при замыкании А-О отклонения НН равны 4330 В;
- при замыкании В-О отклонения НН равны 3364 В;
- при замыкании С-О отклонения НН равны 3402 В;
- при замыкании и обрыве А-О+обр.А отклонения НН равны 4725 В;
- при замыкании и обрыве В-О+обр.В отклонения НН равны 3764 В;
- при замыкании и обрыве С-О+обр.С отклонения НН равны 3728 В;
- при обрыве и замыкании обр.А+А-О отклонения НН равны 1038 В;
- при обрыве и замыкании обр.В+В-О отклонения НН равны 2101 В;
- при обрыве и замыкании обр.С+С-О отклонения НН равны 2133 В;
- при двойном замыкании А-О+В-О отклонения НН равны 1960 В;
- при двойном замыкании А-О+С-О отклонения НН равны 1827 В;
- при двойном замыкании В-О+С-О отклонения НН равны 862 В;

Таким образом, при расположении проводника ниже фаз линии появляется возможность определения практически всех режимов, где присутствуют замыкания на землю. Отклонения НН от нормального режима составляют значительную величину - более 860 В. Отклонения НН в режимах коротких замыканий и обрывов не такие большие как в режимах с замыканиями на землю. Поэтому эти режимы определить труднее, о чем будет сказано далее.

Однако, подвеска провода даже в одном пролете (70 м) вызывает трудности. Поэтому представляет интерес провести исследования при меньшей длине провода. Так вместо провода можно взять металлический стержень или трубу покрытую изоляцией для безопасности. Исследования показали, что различия НН при проводе длиной 70 метров и стержне длиной 5 метров - не большие (1-60 В). Таким образом, при малой длине проводника, всего 5 метров - можно определить все аварийные режимы, как и при проводнике, длиной 70 метров. Кроме того, как показали расчеты и эксперимент - длина проводника может быть и всего 2 метра.

Величина НН зависит от несимметрии фазных напряжений и токов при различных видах аварийных несимметричных режимов. Чтобы разобраться в причинах возникновения наибольших НН была исследована указанная несимметрия. Для этого были построены векторные диаграммы напряжений и токов во всех аварийных режимах. Наибольшими отклонениями являются отклонения модулей фазных напряжений. Именно эти отклонения и создают наибольшие НН.

Как отмечено, причиной возникновения НН является несимметрия фазных напряжений в линии 10 кВ. При различных аварийных режимах в линии 10 кВ распределение напряжений зависит от точки возникновения аварийного режима вдоль длины линии. При этом напряжения неповрежденных фаз практически не изменяются, а в основном изменяются напряжения поврежденных фаз. Было исследовано распределение напряжений при всех аварийных режимах.

Место повреждения сильно влияет на распределения напряжений вдоль длины линии 10 кВ. Наибольшие отклонения от номинальных напряжений наблюдаются в самих точках несимметрии. Таким образом, НН будут наибольшими, если располагать

проводник антенны рядом с несимметрией в самой линии. Это свойство можно использовать для определения места повреждения, как будет показано далее.

Далее проведены исследования по возможности определения видов аварийных несимметричных режимов в линии 10 кВ по интервалам изменения НН при возникновении этих режимов в начале, в середине и в конце линии. В качестве примера такие интервалы представлены на рисунке 5 при длине линии 10 км.

Анализ рисунков подобных рисунку 5 показал, что для определения видов режимов можно использовать укрупненные группы и более детальные группы, между которыми есть достаточная разница НН.

Так для приведенного примера на рисунке 5 - все интервалы можно разбить на 3 укрупненные группы:

1. Все короткие замыкания. НН изменяются от 30 до 65 В.
2. Все двойные замыкания и все одновременные обрывы с замыканиями. НН изменяются от 2192 до 2410 В.
3. Все однофазные замыкания и все одновременные замыкания с обрывами. НН изменяются от 4387 В до 4794 В.

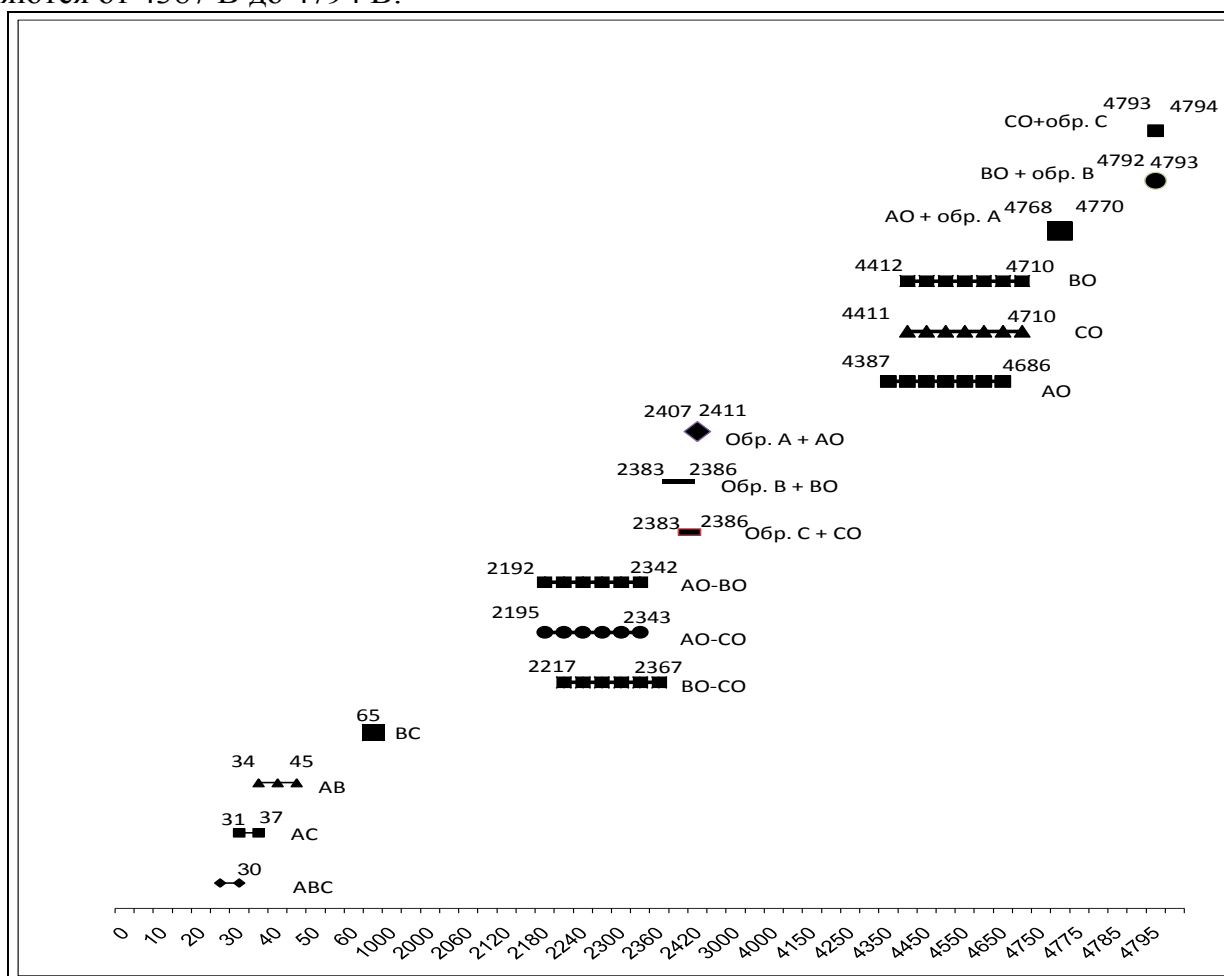


Рисунок 5. Интервалы изменения НН для различных режимов

Разность НН между указанными укрупненными группами составляет:

- между группами 2-1 разность равна 2127 В;
- между группами 3-2 разность равна 1977 В.

Подобные выводы справедливы и для других точек расположения стержней антенны, причем при любой длине линии.

Также анализ показывает, что все интервалы можно разбить на 7 детальных групп:

1. Все короткие замыкания. НН изменяются от 30 до 65 В.

2. Все двойные замыкания. НН изменяются от 2192 до 2367 В.
3. Одновременные обрывы и замыкания: обр.В+ВО и обр.С+СО. НН составляют 2385 В.
4. Одновременные обрыв и замыкание обр.А+АО. НН составляют 2410 В.
5. Все однофазные замыкания: АО, ВО, СО. НН изменяются от 4387 В до 4710 В.
6. Одновременное замыкание и обрыв АО+обр.А. НН составляют 4770 В.
7. Одновременные замыкания и обрывы: ВО+обр.В, СО+обр.С. НН изменяются от 4793 В до 4794 В.

Разность НН между указанными детальными группами уже не такая большая.

Подобные выводы справедливы и для других точек расположения стержней, причем при любой длине линии.

Таким образом, для определения вида аварийного режима можно пользоваться как укрупненными, так и детальными группами. Однако, детальные группы требуют более точных вычислений и измерений НН.

После определения вида аварийного режима наибольший интерес представляет задача по определению его возможного места возникновения. Для этого были проведены расчеты при размещении стержня длиной 5 метров в трех точках: в точке «Середина» (высота 8,789 м), в «точке 1» (высота 8,5 м) и в «точке 2» (высота 7 м) для длины линии 10 км и 20 км. Для определения места АР можно использовать графики зависимости НН от точки возникновения режима вдоль линии 10 кВ. Для расчета были выбраны три точки вдоль длины линии: в начале, в середине и в конце линии 10 кВ. По результатам расчетов были построены соответствующие графики. Примеры графиков при однофазном замыкании А-О и при двойном замыкании АО-ВО представлены на рисунке 6.

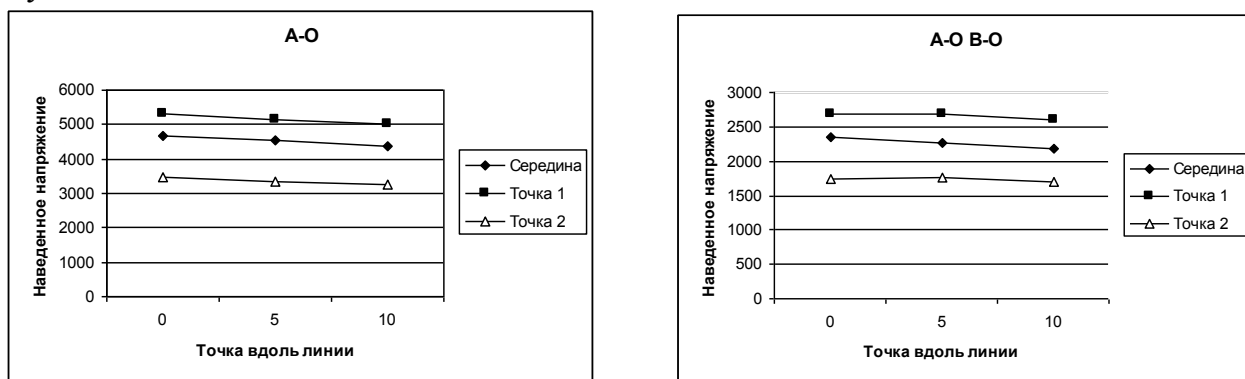


Рисунок 6. Изменение НН при перемещении аварии вдоль длины линии.

Если получить аналитические зависимости данных графиков, то по ним можно будет определять место аварийного режима. Для получения этих аналитических зависимостей можно использовать интерполяционные полиномы вида $P(x)$. Для данной задачи в диссертации использован полином, который рассчитывается по матрице Вандермонда. Этот полином можно построить всегда, так как матрица Вандермонда всегда не особенная и всегда существует обратная матрица.

Такие полиномы пройдут через все заданные точки значений графиков НН, подобных представленным на рисунке 6 для всех рассмотренных аварийных режимов.

Для определения диапазона длин, где возможно возникновение рассматриваемого аварийного режима использован интервал значений с учетом погрешности расчета или измерения НН. Допустим, что эти значения НН будут рассчитываться или измеряться с погрешностью Δ . Тогда определим максимальную и минимальную границы измеренных (или расчетных) величин НН:

$$U_i' = U_i + \Delta \cdot U_i; \quad U_i'' = U_i - \Delta \cdot U_i, \quad (5)$$

где U_i' , U_i'' – верхняя и нижняя границы измеренной (или расчетной) величины

соответственно с учетом погрешности Δ ; U_i – значение измеренной величины в необходимой точке кривой (например, при длине линии 10 км значение U_i можно взять в средней точке, соответствующей длине 5 км).

Чтобы найти первую x_1 и вторую x_2 границу интервала dL , в котором возможно возникновение рассматриваемого АР, решается уравнение при приравнении полинома $P(x)$ сначала к U' и затем к U'' соответственно. После чего находится место определения АР в виде длины интервала dL :

$$P(x) = U' \rightarrow x_1 \quad P(x) = U'' \rightarrow x_2 \quad dL = x_2 - x_1 \quad (6)$$

Так для однофазного замыкания на землю А-О полином будет иметь вид:

$$P(x) = 0,022 \cdot x^2 - 30,1 \cdot x + 4686$$

Для всех рассмотренных видов аварийных режимов были проанализированы результаты расчетов при длине линии 10 км и 20 км. Анализ показал, что при длине линии от 10 до 20 км погрешность определения интервала, в котором возможно возникновение аварийного режима составляет:

- для однофазных замыканий на землю (0,09-0,17) от длины линии.
- для двухфазных коротких замыканий (0,03-0,035) от длины линии.
- для трехфазного короткого замыкания (0,0078-0,008) от длины линии.
- для двойных замыканий на землю (0,12-0,27) от длины линии.

Если обобщить представленные исследования, то можно заключить, что использование предложенного способа определения вида и места аварийных режимов в линии 10 кВ позволяет уменьшить обход линии при длине линии от 10 до 20 км на 8,8-14,4 км при ДЗЗ и на 9,1-16,6 км при ОЗЗ соответственно.

Представленная методика определения места аварийного режима предусматривает процедуру обращения матрицы Вандермонда и решение два раза нелинейного уравнения. Это создает определенные трудности. Чтобы избежать этого, в работе получены аналитические выражения для коэффициентов полинома и интервала длин линии, где произошло повреждение:

$$t_1 = \frac{UU_2 \cdot (1 + \Delta) - UU_1}{\frac{1}{2} \cdot (UU_3 - UU_1)} \quad t_2 = \frac{UU_2 \cdot (1 - \Delta) - UU_1}{\frac{1}{2} \cdot (UU_3 - UU_1)} \quad dL = t_1 - t_2 = \frac{2 \cdot L \cdot UU_2 \cdot \Delta}{UU_3 - UU_1} \quad (7)$$

Здесь обозначено: L – длина линии 10 кВ; UU_1, UU_2, UU_3 – НН при повреждении в начале, в середине и в конце линии 10 кВ; Δ – погрешность вычисления или измерения НН. Расчеты показали, что вычисления по (7) дают практически одинаковые результаты с вычислениями по (5) и (6).

Приведенные выше исследования уровней НН в АР проведены при металлическом замыкании (т.е. при малом переходном сопротивлении равном 0,1 Ом). Представляет интерес проведение исследований при замыканиях через переходное сопротивление, т.к. на практике большинство замыканий не металлические. Для этого было принято переходное сопротивление равное 500 Ом, при котором графики фазных токов и фазных напряжений насыщаются. Т.е. когда в линии 10 кВ переходное сопротивление неизвестно, его можно принять равным 500 Ом. Это было показано в предыдущих исследованиях, проведенных в Костромской ГСХА. Результаты расчетов наведенных напряжений на стержне антенны при переходном сопротивлении 0,1 Ом и 500 Ом показали, что уровни наведенных напряжений изменяются менее, чем на 5 %, при всех АР с замыканиями. Таким образом, влияние переходного сопротивления на НН в АР, где присутствуют замыкания на землю незначительное. Это очень важный вывод, т.к. он позволяет утверждать, что определение вида и места аварийного режима не зависит от переходного сопротивления в месте аварии. Значит, выбранные приборы

будут одинаково реагировать на НН при любом переходном сопротивлении. Этого не позволяют делать многие методы и устройства, рассмотренные в разделе обзора.

Итак, если фидер магистральный, то по НН можно судить о месте возникшего АР в нем. Однако, преимущественно фидера 10 кВ имеют разветвленную структуру. В этом случае одна антенна, размещенная в начале разветвленного фидера, не может обеспечить однозначное определение места аварийного режима. Надо перечислить все возможные случаи в ответвлениях с одинаковым расстоянием до аварии. Чтобы устранить этот недостаток можно использовать одну антенну в начале линии после питающего трансформатора и несколько антенн в конце каждого ответвления перед потребительскими трансформаторами 10/0,4 кВ, как показано на рисунке 7.

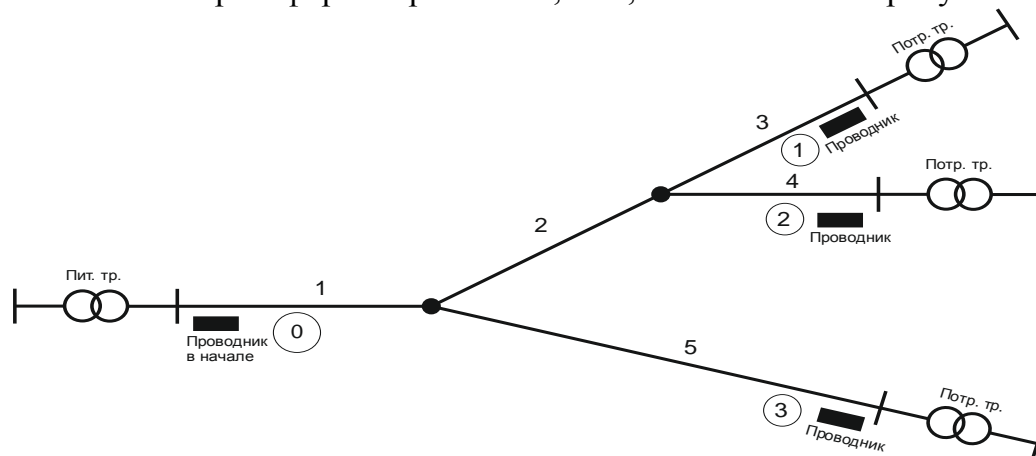


Рисунок 7. Разветвленный фидер 10 кВ с проводником в начале (0) и проводниками перед каждым потребительским трансформатором (1, 2, 3)

Были проанализированы результаты расчета НН на антенне, размещенной в начале линии после питающего трансформатора, и на антеннах, размещенных перед потребительскими трансформаторами. НН рассчитывались при аварии в начале, в середине и в конце линии 10 кВ. Так, например, при перемещении точки аварии от начала линии к ее концу - НН будут уменьшаться на антенне в начале и увеличиваться на антенне в конце. И наоборот - при перемещении от конца к началу. На рисунке 8 для примера построены графики изменения НН при перемещении точки аварии вдоль линии для однофазного замыкания на землю А-О и двойного замыкания на землю АО-ВО.

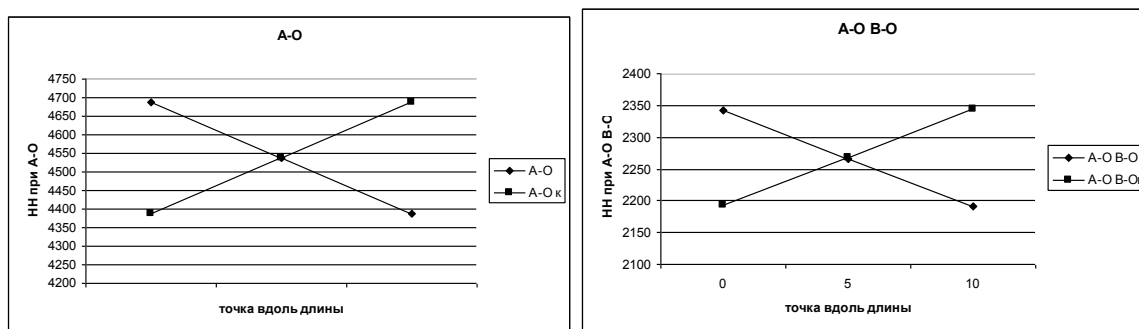


Рисунок 8. Изменение НН на антенне в начале и в конце линии при перемещении однофазного замыкания А-О и двойного замыкания АО-ВО вдоль длины линии

При двухфазных и трехфазном коротких замыканиях изменение НН не такое большое. При обрывах НН практически не изменяются. Анализ исследований показывает, что при расположении антенн у каждого потребительского трансформатора 10/0,4 кВ можно определить ответвление, где возникла авария с замыканиями. Это можно сделать по наибольшим наведенным напряжениям. Так, например для рисунка 7:

- если НН на проводнике 1 больше всех остальных, то надо отключить ответвление 3;
- если НН на проводнике 2 больше всех остальных, то надо отключить ответвление 4;

- если НН на проводнике 3 больше всех остальных, то надо отключить ответвление 5.
- если НН на проводнике 0 больше всех остальных, то надо отключить магистраль 1.

Чтобы автоматизировать процесс поиска ответвления с возникшей аварией можно оснастить антенну средством измерения НН и каналом связи с компьютером диспетчера. На компьютер будут переданы все значения НН на антеннах и выбрано наибольшее значение, по которому и будет определено ответвление с аварией. Аварийное ответвление также можно определить и с помощью обхода - по НН на вольтметрах или дисплеях в точках установки антенн. Наибольшие НН возникают в точках линии - где присутствует наибольшая несимметрия напряжений. Это обстоятельство и позволяет определить место аварии в разветвленных фидерах 10 кВ при расположении антенн у всех потребительских трансформаторов. Если от одной подстанции отходят несколько фидеров 10 кВ, то фидер, где произошла авария, также можно определить по наибольшему НН на всех антеннах из всех фидеров.

В четвертой главе «Исследование наведенных напряжений на многопроводных антеннах для определения аварийных режимов» проведены исследования возможности определения видов аварийных режимов линии 10 кВ по НН на многопроводниковых антеннах. Сначала рассмотрены антенны, состоящие из трех стержней при расположении стержней: по вписанной окружности; по описанной окружности; по горизонтали; по вертикали; по треугольнику вершиной вверх; по треугольнику вершиной вниз. Для всех указанных расположений были рассчитаны НН при отсутствии нагрузки, подключенной к проводникам (на холостом ходу) и при нагрузке подобранной так, чтобы величина НН при однофазном замыкании фазы А на землю (А-О) составляла 220 В. (Можно было получить и любое другое желаемое значение НН, например: 127 В, 110 В, 24 В или 12 В).

Анализ результатов расчета при замыкании А-О показал, что НН на холостом ходу для рассмотренных расположений стержней отличаются не значительно от 4082 В до 4557 В. Это говорит о том, что рассмотренные расположения близки друг к другу по эффективности. Наибольшее влияние оказывают расстояния между стержнями и расстояния от стержней до фаз линии. При этом необязательно применять расположения с центром тяжести, совпадающем с центром фаз линии. Можно использовать и другие расположения. Рассмотренные ранее расположения, когда проводники размещаются между фазами линии, имеют большое теоретическое значение. Потому что это создает трудности, как при монтаже, так и при эксплуатации таких антенн. Поэтому представляет интерес рассмотрение других конструкций антенн, в которых стержни расположены на достаточном расстоянии от фаз линии, от опоры и от земли. Рассмотрены разные многопроводные антенны. Число стержней в антенне принято равным один, три и пять. Примеры расположения этих стержней представлены на рисунке 9. Во всех рассмотренных расположениях расстояние между стержнями антенны принято 0,2 метра. Все стержни соединены между собой в единую антенну. Расчеты велись как на холостом ходу антенны, так и при нагрузке, подключенной к антенне на землю. Величина сопротивления нагрузки выбиралась из условия, чтобы НН в режиме однофазного замыкания фазы А на землю равнялось бы 220 В. Результаты расчета для расположения представленного на рисунке 9,а - представлены в таблице 1.

Анализ результатов расчета показал, что отношение НН U_{xx} на холостом ходу к НН с нагрузкой U одинаково для всех режимов при данном числе проводников. Это говорит о том, что характер изменения НН как на холостом ходу, так и при нагрузке в зависимости от вида АР совершенно одинаков. То есть, о виде АР можно судить как по НН на холостом ходу, так и по НН с нагрузкой. Будем это делать по НН с нагрузкой, так как к антенне будут подключаться приборы, обладающие своим сопротивлением, к которому можно подключить дополнительное сопротивление, обеспечивающее нужное

суммарное сопротивление нагрузки. Кроме того, как видно из таблицы 1 - о виде AP одинаково можно судить по НН при любом числе проводников в антенне (n).

Мощность подключенной нагрузки зависит от числа проводников ($n= 1, 3, 5$) и обратно пропорциональна сопротивлениям нагрузки. Мощность также зависит от достигнутого НН в данном режиме.

Анализ показал, что при увеличении числа проводников в три раза ($n=3$) отношение сопротивлений нагрузки изменяется не в три раза, а всего в (1,51-1,71) раз.

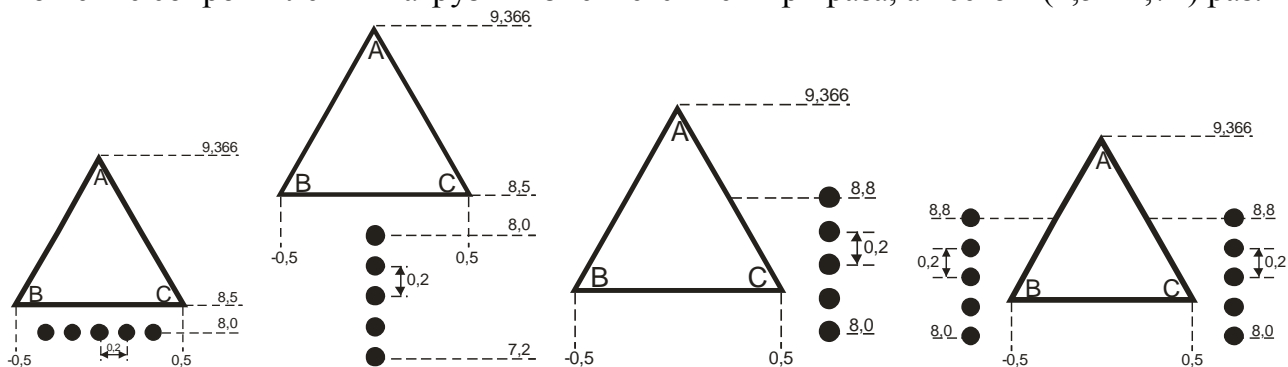


Рисунок 9. а) - горизонтальное расположение под линией; б) – вертикальное расположение под линией; в) – вертикальное расположение сбоку от линии; г) – вертикальное расположение с двух сторон

При увеличении числа проводников в пять раз ($n=5$) отношение сопротивлений нагрузки изменяется не в 5 раз, а всего в (1,72-2,2) раза. Это объясняется тем, что при увеличении числа проводников НН увеличиваются не значительно. При этом мощность зависит от величины воздушных емкостных сопротивлений между всеми стержнями и фазами линии, которые и ограничивают эту мощность. Показано, что при рассмотренных расположениях проводников, все режимы, где присутствуют замыкания фаз на землю можно определить по большой величине НН. При этом, можно сообщить, что «есть замыкание на землю» - если НН больше 50 В, больше 50 В и больше 65 В соответственно для расположений на рисунке 9 – а, б, в.

Рассмотренные антенны представленные на рисунке 9 – а, б, в позволяют определить все режимы с замыканием фаз на землю и отстроиться от нормального режима. Еще большую детализацию режимов с замыканием можно осуществить, если расположить стержни сбоку от линии с двух сторон. Такое расположение показано на рисунке 9, г. Кстати, это расположение наиболее безопасное при эксплуатации и никак не влияет на работу линии, потому, что проводники достаточно удалены от фаз.

Таблица 1. НН на антенне с расположением стержней согласно рисунку 9,а горизонтально под фазами линии 10 кВ.

ВИД РЕЖИМА	Число проводников					
	n=1		n=3		n=5	
	U, В	U _{xx} , В	U, В	U _{xx} , В	U, В	U _{xx} , В
НОРМ	36,3	755,4	36,9	763,4	37,2	769,6
А-О	221,3	4603,8	222,4	4607,7	222,1	4597,1
А-В	31,8	661,0	32,2	667,9	32,5	673,2
А-В-С	26,3	548,1	26,7	553,7	27,0	558,0
А-О В-О	116,9	2432,0	117,6	2435,7	117,5	2431,9
обр А	36,9	767,4	37,4	775,6	37,8	781,8
АО+обрА	237,9	4948,7	239,1	4952,4	238,7	4940,4
обрА+АО	60,4	1257,2	60,2	1246,9	59,5	1231,8

Из таблицы 1 видно, что различие НН при разном числе проводников для всех режимов составляют всего (0-8)%, то есть о виде AP можно судить при любом числе проводников в антенне.

Если не применять аккумуляторы или батарейки, то ограничением мощности нагрузки подключенной к антенне являются емкостные воздушные сопротивления между стержнями антенны и фазами линии. Чтобы увеличить мощность антенны необходимо уменьшить расстояния между стержнями антенны и фазами линии. Например, подвешивая стержни антенны на изоляторах непосредственно к проводам линии. При применении аккумуляторов или батареек, требования по необходимой мощности антенны исчезают. Поэтому, в этом случае, можно выбирать расположения стержней антенны с точки зрения надежности и удобства эксплуатации. Например, как показано далее, при проведении эксперимента был использован мультиметр с батарейкой, который давал правильные показания НН.

Таким образом, исследования показали, что на практике, например, можно использовать антенну, состоящую всего из одного проводника, расположенного на расстоянии 1 метр от фаз линии и на расстоянии 0,5 метров от стойки опоры. Такая конструкция показана на рисунке 10, а. На этом рисунке обозначено: 1 – штыревые изоляторы 10 кВ; 2 - антенна с одним стержнем на штыревом изоляторе; 3 – стойка опоры; 4 – заземление; 5 – устройство измерения и передачи данных; 6 – хомут крепления.

Видно, что антенна расположена на достаточном расстоянии под фазами (1 метр) линии и на достаточном расстоянии от земли (7,5 метров), т.е. она не нарушает габарит до земли (7 метров). На рисунке 10, б показана возможная схема устройства 5. Здесь обозначено: 1 – вольтметр; 2 – устройство сбора и передачи данных (gsm - модем); 3 – батарейка или аккумулятор; 4 – светодиод; 5 – добавочное сопротивление; 6 – вход от стержней антенны; 7 – антенна gsm – модема; 8 – выход к заземлению.

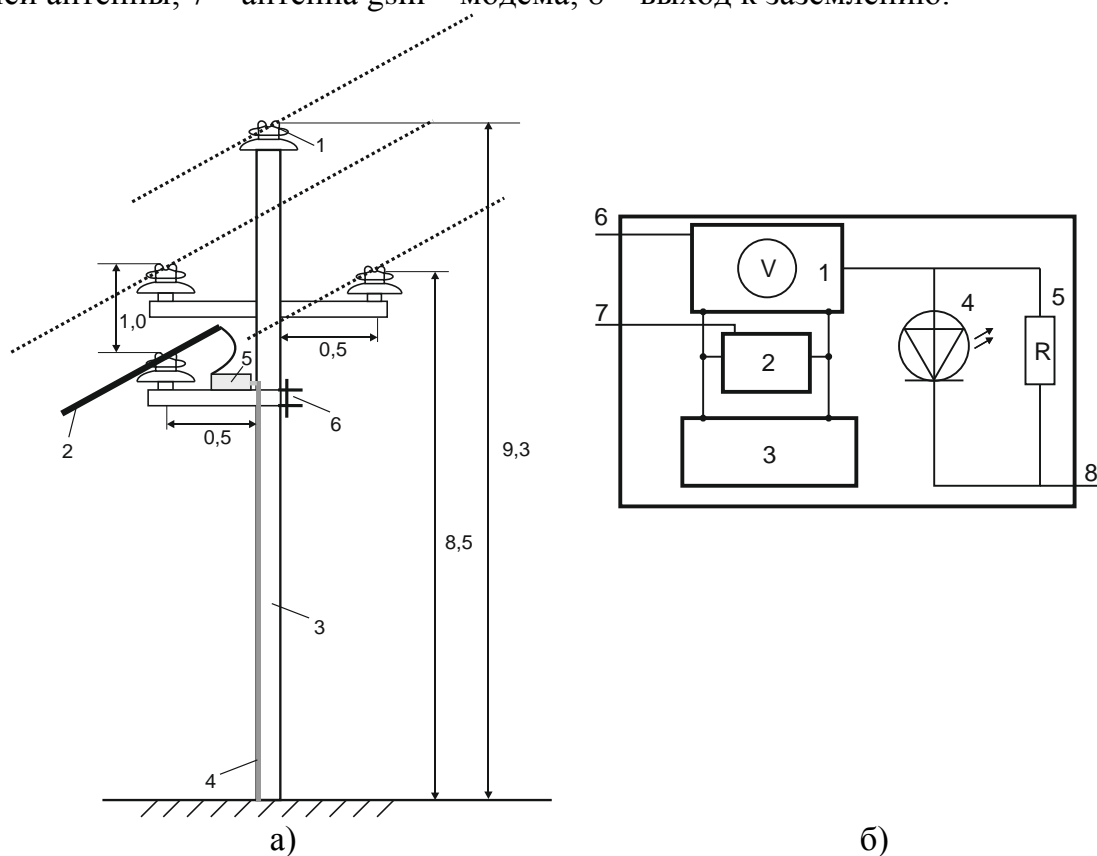


Рисунок 10. а) – расположение антенны и устройства сбора и передачи данных на опоре;

б) – возможная схема устройства

Расположение одностержневой антенны на рисунке 10,а является частным случаем многостержневой антенны, рассмотренной в полученном патенте на полезную модель. Устройство, показанное на рисунке 10,б будет работать следующим образом. На

вход 6 подается наведенное напряжение от антенны, которое измеряется вольтметром 1 и передается при помощи gsm – модема на компьютер диспетчера. От этого наведенного напряжения запитывается светодиод 4, который является дополнительным индикатором того, что появилось замыкание в линии 10 кВ. Добавочное сопротивление 5 выбирается таким образом, чтобы наведенное напряжение составляло необходимую нам величину, например 220 В в режиме однофазного замыкания на землю. В этом случае во всех других аварийных режимах НН будет меньше 220 В. Надо отметить, что вместо одного светодиода можно подключить три светодиода разного цвета (красный, желтый, зеленый) через логически-коммутирующее устройство. Каждый диод будет соответствовать значениям НН одной из трех укрупненных групп перечисленных на странице 12. Надо отметить, что если антенну разместить на первой от подстанции опоре (т.е. на расстоянии 50-100 метров от трансформатора собственных нужд), то к устройству 5 можно подвести питание 220 В обычным проводом. Кроме того, вместо передающего gsm – модема можно применить канал связи через порт RS485 соответствующим кабелем от устройства до компьютера диспетчера. На компьютере диспетчера будет размещена программа, по которой предварительно будет рассчитана база данных по величинам НН при различных АР фидеров 10 кВ. При сверке переданного НН с базой программа будет выдавать вид и место произошедшего АР.

В пятой главе «Экспериментальные исследования и экономическая эффективность» приведены результаты эксперимента и сделана оценка технико-экономической эффективности усовершенствованного метода ОМП.

Эксперимент. Для подтверждения усовершенствованного метода расчета НН на стержнях антенны были проведены экспериментальные исследования. Для этого была собрана конструкция, состоящая из двух изоляционных стоек высотой 3 метра с тремя поперечными креплениями. Вверху стоек были прикреплены две алюминиевые трубы (стержни антенны) диаметром 15 мм и длиной 2 метра каждая. Эти трубы для безопасности были помещены в изоляционные шланги. Один конец первой трубы был ни с чем не соединен, второй конец первой трубы соединен с началом второй трубы, второй конец второй трубы соединен с мультиметром, работающем на батарейке, а тот в свою очередь был соединен с заземлением. Схема конструкции представлена на рисунке 11. Были проведены измерения под

линией 10 кВ и под двухцепной линией 35 кВ. Измерения и расчеты проводились под центральной фазой, под крайней фазой и на расстоянии 1 метр от крайней фазы линии. Результаты расчета и измерения сведены в таблицу 2. Наибольшее совпадение расчетных и измеренных НН наблюдалось при суммарном сопротивлении нагрузки и заземления равном 5 МОм. В паспорте мультиметра указано именно это сопротивление – 5 МОм. На рисунке 11 обозначено: 1 – провода линии 10 кВ; 2 – стержни антенны; 3 – изоляционные стойки; 4 – мультиметр; 5 – заземление.

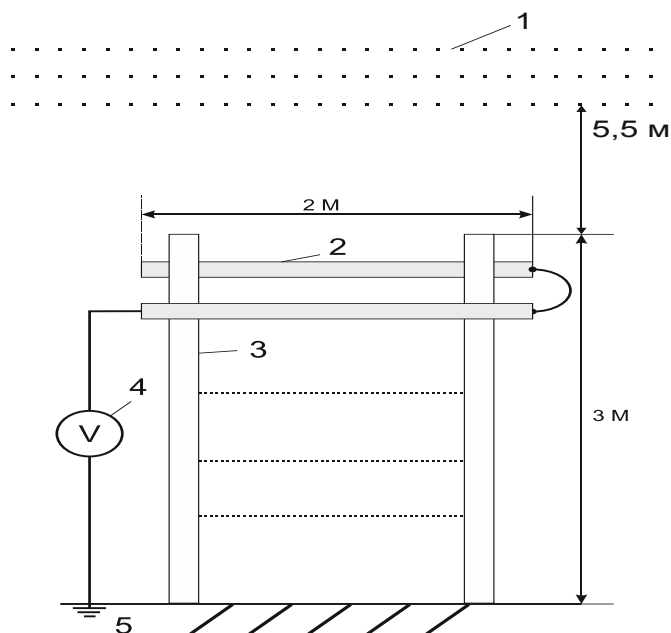


Рисунок 11. Схема проведения эксперимента

Из таблицы 2 видно, что для линии 10 кВ при сопротивлении 5 МОм отклонения измеренных и расчетных НН составляет всего (0,7 - 1,56) В. Так же из таблицы 2 видно,

что для линии 35 кВ при сопротивлении 5 МОм отклонения измеренных и расчетных НН составляет всего (1,1 - 4,9) В. Причем наименьшие погрешности наблюдаются при измерениях под центральной фазой. Погрешность связана с незнанием точного суммарного сопротивления нагрузки с заземлением и координат проводов, а также уровня фазных напряжений рассмотренных линий 10 кВ и 35 кВ.

Таблица 2. Рассчитанные и измеренные НН под линией 10 кВ и под линией 35 кВ

ПАРАМЕТР	НН под центральной фазой, В	НН под крайней фазой, В	НН на расстоянии 1 метр от фазы, В
Рассчитанное НН под ЛЭП 10, В	2,7	2,77	2,76
Измеренное НН под ЛЭП 10, В	1,5 – 2,0	1,5- 1,9	1,0- 1,2
Рассчитанное НН под ЛЭП 35, В	40,3	32,1	28,0
Измеренное НН под ЛЭП 35, В	37,1 – 39,2	28,5- 29,1	21,4- 23,1

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что разработанная теория расчета верна и при ее помощи можно рассчитывать НН на антеннах. Таким образом, длина стержня антенны может составлять всего 2 метра и этот стержень можно прикрепить к своему изолятору, так же как крепятся провода линии 10 кВ. В процессе эксперимента были сделаны фотографии, которые представлены в диссертации. Более того, расчеты показали, что длина стержня антенны может быть и 1 метр, но это надо подтвердить экспериментом.

Технико-экономическая эффективность. Экономическая эффективность методов ОМП достигается сокращением перерывов электроснабжения и уменьшением ущерба от недоотпуска электроэнергии. Необходимо уменьшить время восстановления электроснабжения, которое складывается из времени на обнаружение места повреждения и времени на непосредственное устранение перерыва в электроснабжении. Поэтому особую важность приобретает повышение эффективности работы линий за счет более точного определения места повреждения.

Для выявления экономической эффективности было проведено сравнение усовершенствованного предлагаемого метода ОМП по наведенным напряжениям на антеннах и метода, использующего токи и напряжения линии 10 кВ в координатах трех симметричных составляющих. Для реализации этих методов необходимы конкретные устройства. Для предлагаемого усовершенствованного метода ОМП используем конструкцию, показанную на рисунке 10. Для сравниваемого метода используем приборы ОМП, выпускающиеся промышленностью. Они получили название ИМФ и его современный аналог Сириус-2 ОМП. Эти приборы универсальны и по их паспорту предназначены для ОМП в сетях 6 – 750 кВ. Кроме них, приборов дистанционного ОМП без отключения линии не выпускается.

В этих приборах совмещено измерение напряжений и токов, вычисление расстояния до места повреждения и средство передачи результатов на компьютер. Измеряются три фазных напряжения (U_a, U_b, U_c) и три фазных тока (I_a, I_b, I_c). Методы определения вида и места аварийного режима основаны на соотношениях напряжений и токов прямой, обратной и нулевой последовательности, которые рассчитываются по измеренным фазным значениям. Пуск прибора осуществляется по соответствующим соотношениям между этими токами и напряжениями для каждого вида аварийного режима Место аварийного режима определяется по формулам, использующим значения напряжений и токов, а также величины удельных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности. Показания справедливы только при металлическом коротком замыкании. При дуге и замыкании через переходное сопротивление возможна неправильная работа прибора, который выдает сообщение, что до места повреждения 999 км. В сети с изолированной нейтралью определяется место аварии только для двухфазных и трехфазных коротких замыканий.

Например, в сети с глухозаземленной нейтралью для определения расстояния до однофазного короткого замыкания L_p используется формула:

$$L_{\delta} = \frac{3 \cdot \hat{E}t}{2 \cdot X1\delta\ddot{a} + X0\delta\ddot{a}} \cdot \frac{U}{I} \cdot \sin \phi \quad (8)$$

где $X1_{уд}$, $X0_{уд}$ – удельные реактивные сопротивления линии прямой и нулевой последовательности; U , I – измеренные напряжение и ток; ϕ – угол между U и I ; Kt – коэффициент, зависящий от примененных трансформаторов тока и напряжения.

Для двухфазных и трехфазных коротких замыканий применяют формулы похожие на выражение (8).

Для выявления экономической эффективности были сравнены 3 варианта определения вида и места АР:

1) Вариант 1, когда средство определения вида и места повреждения основано на методе трех симметричных составляющих (ИМФ-1Р);

2) Вариант 2, когда средство определения вида и места повреждения основано на преобразованном методе трех симметричных составляющих (СИРИУС-2 ОМП);

3) Вариант 3, когда средство определения вида и места повреждения основано на предлагаемом в данной работе усовершенствованном методе, использующем НН на антенне.

При оценке экономической эффективности были рассчитаны: вероятность устойчивого повреждения на ВЛ-10 кВ; среднее время восстановления аварии; расстояние обхода; время, потраченное на обход участка; время на устранение одного повреждения; время за год в отключенном состоянии; ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям; внезапно отключенная мощность; капитальные вложения; годовые эксплуатационные издержки; амортизационные отчисления; издержки на оплату труда; издержки на ремонт и техническое обслуживание; прочие издержки; трудоемкость обслуживания; годовая экономия; срок окупаемости; приведенные затраты; годовой экономический эффект; срок окупаемости с учетом дисконтирования; чистый дисконтированный доход.

При сравнении предлагаемого усовершенствованного метода с вариантами использования существующих приборов ОМП получается годовой экономический эффект в размере 61750 - 70786 руб. при длине линии 10 км и 79541 - 81012 - руб. при длине линии 20 км.

Чистый дисконтированный доход от внедрения предлагаемого метода определения вида и места АР рассчитывался за 8-летний период и составил: 246997 - 264183 руб. для длины линии 10 км и 306632 - 340385 руб. для длины линии 20 км. Техничко-экономические показатели при длине линии 20 км приведены в сравнительной таблице 3.

Таблица 3 – Экономическая эффективность применения предлагаемого усовершенствованного метода на 1 фидер 10 кВ длиной 20 км

Показатели:	Предлагаемый вариант 3	
	относительно варианта 1 (ИМФ)	относительно варианта 2 (СИРИУС)
Капитальные вложения, руб.	КВ3=21667 КВ1=63922	КВ3=21667 КВ2=100528
Годовые эксплуатационные издержки, руб.	ИЗ=5980 И1=14114	ИЗ=5980 И2=21161
Ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб.	УЗ=472780 У1=539320	УЗ=472780 У2=525312
Приведенные затраты, руб/год.	ПЗ3=482011 ПЗ1=563029	ПЗ3=482011 ПЗ2=561552
Годовой экономический эффект, руб.	81012	79541
Срок окупаемости, лет	0,29	0,32
ЧДД за 8 лет, руб.	340385	306632

Расчеты произведены для одного фидера. Потенциально данная разработка может быть использована в сетях 10 кВ. Применение предлагаемого усовершенствованного

метода, например на 50-ти фидерах 10 кВ, позволит получить годовой экономический эффект в размере свыше 3 млн. рублей.

Таким образом, выпускающиеся промышленностью универсальные приборы ОМП не достаточно эффективны для их применения в сетях с изолированной нейтралью. Это происходит из-за относительно большой цены этих приборов и малой отключающей мощности потребителей в сетях с изолированной нейтралью (для линии 10 кВ отключающая мощность нагрузки составляет всего 1800 кВт). Для сетей класса 110 кВ и выше отключающая мощность потребителей сильно возрастает и цена приборов уже не сильно влияет на экономический эффект. Поэтому использование, например, приборов СИРИУС - 2 ОМП в сетях класса 110 кВ и выше оправдано и сейчас идет их успешное и массовое внедрение. Для сетей с изолированной нейтралью необходимо разрабатывать новые специальные методы и приборы ОМП. Одним из таких методов может являться предлагаемый в данной работе усовершенствованный метод ОМП по наведенным напряжениям на антеннах.

В Приложении приведены акт о внедрении и справка об использовании в учебном процессе результатов данной диссертационной работы.

Основные выводы по работе:

1. Усовершенствованы методы и программы расчета аварийных режимов фидеров 10 кВ и наведенных напряжений на проводниках антенны.

2. Проведены исследования и показано, что чередование фаз линии 10 кВ, длина стержня антенны, а также переходное сопротивление в месте замыкания линии 10 кВ оказывают малое влияние на наведенные напряжения. Это имеет важное значение, т.к. большинство предложенных в литературе методов определения места повреждения справедливы только при металлических замыканиях. Основное влияние на величину наведенных напряжений оказывает несимметрия фазных напряжений и их распределение вдоль длины линии.

3. Показано, что вид аварийного режима можно определить по интервалам наведенных напряжений на антенне. При этом все аварийные режимы можно разбить или на 3 укрупненные группы или на 7 детальных групп с выделением коротких замыканий, однофазных замыканий на землю, двойных замыканий на землю, обрывов, одновременных замыканий с последующим обрывом, одновременных обрывов с последующим замыканием. Наибольшие наведенные напряжения возникают при режимах с замыканиями на землю. Это имеет важное значение, т.к. именно эти режимы наиболее трудно определяются в сетях 10 кВ.

4. Показано, что место аварийного режима можно определять по интерполяционным зависимостям наведенных напряжений от места возникновения повреждения вдоль длины линии 10 кВ. Получено аналитическое выражение для определения расстояния до повреждения. При этом в разветвленных фидерах место АР можно определять по наибольшему наведенному напряжению на антеннах, расположенных перед всеми потребительскими трансформаторами 10/0,4 кВ.

5. Исследованы многопроводные антенны с числом стержней от 1 до 5 при различных их расположениях: горизонтальном, вертикальном под линией, вертикальном сбоку от линии, вертикальном с двух сторон от линии. Показано, что все рассмотренные антенны позволяют достичь одинаковых уровней наведенных напряжений. Поэтому вид расположения стержней можно выбирать из условий удобства монтажа и эксплуатации антенн

6. Проведены экспериментальные исследования по замеру наведенных напряжений под линией 10 кВ и под двухцепной линией 35 кВ, подтвердившие правильность предлагаемого усовершенствованного метода расчета НН. Сделана оценка технико-экономической эффективности предлагаемого усовершенствованного метода

определения вида и места аварийных режимов. Показано, что годовой экономический эффект на 1 фидер 10 кВ составляет 60 - 80 тысяч рублей в год.

Основные положения диссертации опубликованы:

- в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Солдатов, С.В. Расчет аварийных режимов фидеров 10 кВ и наведенных напряжений [Текст] / С.В. Солдатов // Научное обозрение. – 2014. - № 5. – С. 135–139.
2. Попов, Н.М. Использование наведенных напряжений для определения аварийных режимов фидеров 10 кВ [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Научное обозрение. – 2014. - № 5. – С. 140–144.
3. Попов Н.М., Солдатов С.В. Определение вида аварийных режимов фидеров 10 кВ по наведенным напряжениям [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Научное обозрение. – 2014. - № 7. – С. 233- 236.
4. Солдатов, С.В. Определение места аварийных режимов фидеров 10 кВ по наведенным напряжениям [Текст] / С.В. Солдатов // Научное обозрение. – 2014. - № 7. – С. 228–232.
5. Попов Н.М., Солдатов С.В. Многопроводные антенны для определения вида аварийных режимов фидеров 10 кВ [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Научное обозрение. – 2014. - № 8. – С. 581–585.

- в прочих изданиях:

6. Попов, Н.М. Использование наведенных напряжений на специальном изолированном проводе для определения вида аварийного несимметричного режима линии 10 кВ [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии.- Кострома: КГСХА, 2012. - Выпуск 76. - С.160-172.
7. Солдатов, С.В. Исследование наведенных напряжений на проводниках малой длины для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ [Текст] / С.В. Солдатов, Н.М. Попов // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы IV Международной научно-практической конференции./ Саратов: СГАУ, 2013. - С.308-312.
8. Солдатов, С.В. Исследование несимметрии фазных напряжений и токов при расчете наведенных напряжений на проводнике параллельном линии 10 кВ [Текст] / С.В. Солдатов // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии.- Кострома: КГСХА, 2013. - Выпуск 78. - С.219-226.
9. Солдатов, С.В. Расчет наведенных напряжений на параллельных линиях [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 63-й международной научно-практической конференции. Кострома, 2012. Т.1. С. 182-185.
10. Попов, Н.М. Исследование наведенных напряжений на специальном изолированном проводе для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ при «прямом» чередовании фаз [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 193-197.
11. Попов, Н.М. Исследование наведенных напряжений на специальном изолированном проводе для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ при «центральном» чередовании фаз [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 197-202.
12. Попов, Н.М. Сравнение наведенных напряжений на специальном изолированном проводе для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ при разном чередовании фаз [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 202-206.

13. Солдатов, С.В. Расчет наведенных напряжений на проводниках, идущих параллельно линиям электропередач [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 217-220.
14. Солдатов, С.В. Наведенные напряжения для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ при различных точках расположения изолированного провода [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 221-225.
15. Солдатов, С.В. Расчет аварийных несимметричных режимов фидеров 10 кВ в фазных координатах для нахождения наведенных напряжений на параллельном тресе [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. Кострома, 2013. Т.1. С. 226-231.
16. Попов, Н.М. Определение вида аварийных несимметричных режимов по наведенным напряжениям на изолированном проводнике [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 65-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2014. – Т.2. – С. 186-189.
17. Попов, Н.М. Определение места аварийных несимметричных режимов фидера 10 кВ по наведенным напряжениям на изолированном проводнике [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 65-й международной научно-практической конференции. Кострома, 2014. Т.2. С. 190-195.
18. Солдатов, С.В. Аналитическое определение места повреждения в линии 10 кВ по наведенным напряжениям [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 65-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2014. – Т.2. – С. 208-211.
19. Солдатов, С.В. Распределение напряжений вдоль линии 10 кВ при различных аварийных режимах [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 65-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2014. – Т.2. – С. 211-214.
20. Солдатов, С.В. Расчет наведенных напряжений на проводниках антенного датчика [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы V Международной научно-практической конференции./ Саратов: СГАУ, 2014. - С.301-305.
21. Солдатов, С.В. Влияние переходного сопротивления в месте замыкания на уровень наведенных напряжений на специальных антеннах [Текст]/ С.В. Солдатов// Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых./ Пенза, ПГСХА, 2014. – С. 219–220.

- авторские свидетельства:

22. Патент на полезную модель 148063. Российская федерация, МПК H02H 3/16. Устройство для регистрации несимметрии фазных напряжений в сетях с изолированной нейтралью. / Н.М. Попов, С.В. Солдатов. - № 2014116178/07, заявл. 22.04.2014, опубл. 27.11.2014, Бюл. №33.

Подписано в печать 01.10.2015 г.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз.

ООО «Реглет», г. Москва, ул. Новослободская 20, стр. 4