

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК (РАСХН)

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
(ГНУ ВИЭСХ)**

На правах рукописи

БАРАНОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОБНАРУЖЕНИЯ
НЕСИММЕТРИЧНЫХ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ КЛАССА 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" (ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Солдатов Валерий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Попов Николай Малафеевич;

кандидат технических наук
Антонов Юрий Михайлович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»

Защита состоится «___» _____ 2012 г. в ___ часов на заседании Диссертационного совета Д 006.037.01 в Государственном научном учреждении Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, г. Москва, 1-ый Вешняковский проезд, д. 2.

Тел.: (499) 171-19-20
Факс: (499) 170-51-01
E-mail: viesh@dol.ru

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 109456, г. Москва, 1-ый Вешняковский проезд, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ВИЭСХ.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г. и размещен на сайтах: <http://www.viesh.ru> и <http://vak.ed.gov.ru> «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



А. И. Некрасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Ежегодно в России растет энергопотребление, строятся новые электростанции, модернизируются старые, прокладываются новые линии электропередач. Общее количество подстанций в России на 2010 год составляет:

- подстанций напряжением 35-220 кВ – 17 тыс.;
- подстанций напряжением 6-35/0,4 кВ – более 500 тыс.

Воздушных и кабельных линий 0,38-220 кВ насчитывается 2,35 млн. км, в том числе:

- напряжением 0,38 кВ – 840 тыс. км;
- напряжением 6-10 кВ – 1,1 млн. км;
- напряжением 35 кВ – 180 тыс. км;
- напряжением 110-220 кВ – 220 тыс. км

Наиболее протяженными являются воздушные линии электропередачи (ВЛ) класса напряжения 6-10 кВ, которые составляют 46,8% от длины всех линий. Стоит отметить, что половина ВЛ 6-10 кВ отработали свой ресурс.

Состояние 15% подстанций 6-10/0,4 кВ неудовлетворительно, более 40% воздушных и масляных выключателей отработали нормативные сроки, а 50% систем релейной защиты и автоматики (РЗА) морально устарели.

Актуальность темы. В настоящее время расчет и обнаружение сложных несимметричных режимов линий электропередачи является актуальной задачей. Фидера 10 кВ имеют протяженность до нескольких десятков километров, поэтому правильно и своевременно обнаружить вид и место возникшей аварийной несимметрии в сети позволит сократить время ремонтной бригаде устранить неисправность.

Для расчета несимметричных режимов применяется в основном два метода: метод трех симметричных составляющих и метод фазных координат. Первый метод справедлив только для трехфазных симметричных сетей. В случае расчета несимметричного режима сети этим методом, составляются сложные схемы замещения. То есть, при расчете сложных несимметричных режимов и расчете не трехфазных сетей пользоваться этим методом затруднительно.

На современном этапе существуют мощные вычислительные машины с большой производительностью, которые дают возможность расчета несимметричных режимов в фазных координатах, используя полные матрицы параметров линии, нагрузок, трансформаторов, фильтров и других устройств. При этом, расчет токов и напряжений в узлах и ветвях линии производится в реальных величинах в каждой фазе сети. Этот метод позволяет рассчитывать сети произвольного числа фаз и видов несимметрии. Также важной задачей является разработка способов определения места и вида аварийных несимметричных режимов.

В высоковольтных электрических сетях напряжением 220 кВ и более для определения места повреждения (ОМП) используются современные методы и средства. В распределительных сетях средства ОМП используются

недостаточно. Поэтому представляет интерес совершенствование методов расчета и обнаружения несимметричных аварийных режимов электрических сетей класса 10 кВ. В данной работе эта задача решалась с помощью разработки методики и программы расчета аварийных режимов (АР) в фазных координатах и разработки информационно-поисковой системы.

Целью диссертационной работы является разработка методики обнаружения вида и места несимметрии в фидере 10 кВ на основе современных методов вычисления и измерительных устройств.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать расчетную модель фидера 10 кВ в фазных координатах, включающую в себя модели всех устройств: трансформатор в начале фидера класса 35/10 кВ со схемой соединения обмоток "звезда–треугольник" (или трансформатор 110/10 кВ "звезда с нулем – треугольник"); трансформатор в конце фидера класса 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток "звезда – звезда с нулем"; измерительный трансформатор 10/0,1 кВ; участки линии электропередачи; нагрузку на шинах 0,4 кВ; фильтры напряжения обратной (ФНОП) и нулевой (ФНОП) последовательности, блок несимметрии.

2. Получить аналитические модели трансформаторов, позволяющие при расчете матрицы передачи не использовать процедуру обращения комплексных матриц, а также получить модель объединенной трехпроводной (класса 10 кВ) и четырехпроводной (класса 0,38 кВ) сетей, позволяющей вести расчеты на основе эквивалентной матрицы передачи, что облегчает задачу расчета.

3. Разработать программу расчета несимметричных аварийных режимов фидеров 10 кВ с произвольным местом включения всех устройств вдоль фидера и определить влияние параметров этих устройств на аварийные несимметричные режимы с целью повышения точности расчета.

4. Разработать методику, позволяющую судить о виде и месте произошедшего аварийного режима на основе анализа фазных токов и напряжений в начале линии 10 кВ, а также напряжений на реагирующих органах ФНОП и ФННП при всех видах аварийных несимметричных режимов фидеров 10 кВ, а также при различных длинах линии и различных местах произошедшей несимметрии.

5. Разработать информационно-поисковую систему по определению вида и места несимметрии в фидере 10 кВ, основанную на использовании расчетной базы данных по параметрам аварийных режимов и сравнении их с измеренными аналогичными параметрами, а также оценить технико-экономическую эффективность разработанной системы.

6. Разработать лабораторно-исследовательский стенд по исследованию аварийных несимметричных режимов фидеров 0,38 – 10 кВ для проверки моделей элементов и режимов фидера в фазных координатах.

Объектом исследования является электрическая сеть напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью и режимы ее работы.

Предмет исследования – модели, методы расчетов и средства определения места повреждения электрической сети 10 кВ по параметрам аварийных режимов.

Методы исследования. Для решения указанных задач использовались методы компьютерного моделирования электрической сети 10 кВ на основе метода фазных координат, математические методы с использованием матричной теории электрических сетей, экспериментальные исследования на лабораторно-исследовательском стенде.

Научная новизна работы.

1. Получена усовершенствованная модель фидера 10 кВ и разработана программа расчета на ЭВМ любых видов аварийных несимметричных режимов в фазных координатах на основе выведенных аналитических моделей трансформаторов и эквивалентных матриц передачи совместного моделирования трехпроводной сети 10 кВ, соединенной с четырехпроводной сетью 0,38 кВ.

2. Исследовано влияние на аварийные несимметричные режимы параметров элементов фидера 10 кВ, позволившее оценить степень этого влияния и необходимость их учета для повышения точности расчета. Обоснованы для применения два значения переходного сопротивления: при металлическом замыкании и замыкании через переходное сопротивление в месте повреждения.

3. Предложена методика определения вида и места возникших аварийных режимов, которая основана на анализе фазных токов и напряжений в начале линии 10 кВ, а также напряжений на реагирующих органах ФНОП и ФННП при всех видах режимов в различных местах линии и на выведенных соотношениях между исследованными параметрами.

4. Предложена модель информационно-поисковой системы по обнаружению с достаточной для практического применения точностью вида и места аварийного режима в фидере 10 кВ, основанная на сравнении рассчитанной по разработанной программе базы данных всех режимов фидера с соответствующими измеренными параметрами и передачей сообщения, что повышает эффективность поиска.

Практическая ценность.

Разработана модель информационно-поисковой системы, основанная на программе расчета и рассчитанной базе данных по параметрам АР, а также на использовании цифровых фиксирующих вольтметров и амперметров, что позволяет определять вид и возможный диапазон длин до произошедшей аварии.

Разработан лабораторно-исследовательский стенд, позволяющий проводить исследования различных несимметричных аварийных режимов фидеров 0,38–10 кВ.

Основные результаты диссертации, полученные автором при выполнении исследований, прошли проверку в филиале ОАО "МРСК Центра"– "Костромаэнерго", что подтверждено соответствующим актом внедрения. Результаты диссертации используются в учебном процессе кафедры

информационных технологий в электроэнергетике Костромской ГСХА, что подтверждено справкой.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Методика расчета аварийных несимметричных режимов фидеров 10 кВ в фазных координатах, отличающаяся использованием полученных аналитических выражений для матриц передачи трансформаторов и эквивалентных матриц передачи объединяющей сети 10 и 0,38 кВ.

2. Результаты исследования аварийных несимметричных режимов фидеров 10 кВ при различных параметрах элементов фидера с оценкой степени влияния переходного сопротивления в месте аварии, параметров трансформаторов, параметров линии, мощности и тангенса угла нагрузки, статических характеристик нагрузки.

3. Методика определения вида и места аварийных несимметричных режимов по соотношениям между токами и напряжениями в этих режимах с учетом возможной погрешности.

4. Методика определения вида и места аварийной несимметрии на основе информационно-поисковой системы с использованием базы данных этих режимов и показаний соответствующих приборов, позволяющая повысить эффективность и сократить время поиска повреждения в фидере 10 кВ.

Достоверность исследований обусловлена применением строгих математических преобразований с использованием матричной теории электрических сетей, а также проведенными экспериментами на лабораторной модели фидера 10–0,38 кВ, состоящей из трансформатора, двух участков линии, ФНОП, ФННП, нагрузки и блока несимметрии.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации доложены, обсуждены и получили положительную оценку на международных научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО Костромской ГСХА в 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 годах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях рекомендованных перечнем ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 3-х приложений. Ее содержание изложено на 160 страницах, иллюстрировано 41 рисунком, включает 20 таблиц, библиографический список из 92 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цель и основные задачи исследования, отмечена научная новизна работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание работы.

В первой главе "Методы и средства расчета и обнаружения аварийных несимметричных режимов в электрических сетях 10 кВ" проведен обзор существующих методов расчета несимметричных аварийных режимов, а также приборов обнаружения характера и места повреждения.

Наиболее распространенным методом расчета аварийных режимов с начала XX века был метод 3-х симметричных составляющих, который породил целую индустрию приборов, реагирующих на прямую, обратную или нулевую последовательности. Он справедлив только для 3-х фазных и симметричных сетей. Кроме того, необходимо составлять сложные комплексные схемы замещения при нескольких несимметриях.

В связи с развитием электронных вычислительных машин появилась возможность проводить расчеты фазных величин токов и напряжений. На данном принципе основан метод фазных координат. Данный метод прост в моделировании электрической сети с любым числом фаз, с любой пофазно-различающейся нагрузкой и любым количеством одновременных несимметрий. Данный метод позволяет рассчитывать токи и напряжения в любой точке сети в квазиустановившемся режиме. Каждый элемент сети 10 кВ представлен собственными и взаимными комплексными продольными сопротивлениями фаз и собственными и взаимными комплексными поперечными проводимостями фаз.

Важно отметить, что переход от системы фазных координат к системе симметричных координат возможен через простые операции, связанные с матрицей преобразования. Каждая система имеет свои достоинства и недостатки, поэтому для различных частей схемы можно использовать необходимую систему координат.

Важнейшим параметром надежности энергосистемы является бесперебойная передача качественной электроэнергии потребителям. Число аварийных отключений ВЛ 10 кВ на 100 км длины линии составляет 6-7 раз в год. Источниками аварий ВЛ 6-10 кВ являются:

- повреждение опор – 40 %;
- повреждение изоляторов – 35 %;
- повреждение проводов – 25 %.

На данном этапе для высоковольтных электрических сетей существуют следующие методы определения вида и места повреждения:

- 1) дистанционные, которые делятся на: стоячих волн, импульсные, по параметрам аварийного режима, емкостные, петлевые;
- 2) топографические, которые делятся на: индукционные, электромеханические, акустические, потенциальные.

Для сетей 6-35 кВ используются упрощенные методы определения места повреждения по одностороннему замеру параметров аварийного режима, которые характеризуются экономичностью и простотой приборов измерения и их обслуживания. Однако, они недостаточны для точного определения места и вида несимметрии.

Проведенный обзор позволил обосновать постановку задач исследований.

Во второй главе "Моделирование элементов электрической сети в фазных координатах" приведены матрицы передачи (H) для каждого элемента сети. Модель каждого элемента представляется в виде 2К-полюсника в H-форме или в Y-форме. Для преобразования Y-формы многополюсника к H-

форме и наоборот используются формулы перехода. В общем виде матрица передачи связывает фазные напряжения и токи в начале многополюсника с напряжениями и токами в конце.

$$\begin{aligned} U_{\text{Н}} &= A \cdot U_{\text{К}} + B \cdot I_{\text{К}}; \\ I_{\text{Н}} &= C \cdot U_{\text{К}} + D \cdot I_{\text{К}}, \end{aligned}$$

где $U_{\text{Н}}, I_{\text{Н}}, U_{\text{К}}, I_{\text{К}}$ – столбцевые матрицы фазных напряжений и токов в начале (индекс Н) и в конце многополюсника (индекс К); A, B, C, D – матрицы обобщенных параметров 2К-полюсника.

В матричном виде уравнения многополюсника можно записать как:

$$\begin{bmatrix} U_{\text{Н}} \\ I_{\text{Н}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\text{К}} \\ I_{\text{К}} \end{bmatrix}.$$

В работе приведены и получены следующие матрицы передачи элементов электрической сети:

- 1) силового трансформатора 35/10 кВ со схемой соединения обмоток "звезда – треугольник";
- 2) силового трансформатора 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток "звезда – звезда с нулем";
- 3) линии электропередачи;
- 4) фильтра напряжения обратной последовательности;
- 5) фильтра напряжения нулевой последовательности;
- 6) нагрузки;
- 7) блока несимметрии.

Модель трансформатора

Для получения обобщенных параметров матрицы передачи, например трансформатора "звезда – треугольник", согласно схемы замещения рассчитывается матрица узловых проводимостей:

$$Y = M \cdot Z_{\hat{A}}^{-1} \cdot M^T,$$

где M – матрица инцидентий; M^T – транспонированная матрица инцидентий; $Z_{\hat{A}}^{-1}$ – обратная матрица собственных и взаимных сопротивлений ветвей (обмоток).

После эквивалентирования (исключения промежуточных узлов, в которых ток равен нулю) матрицы узловых проводимостей относительно узлов входа и выхода, связанных с сетью, получают матричные уравнения:

$$\begin{bmatrix} J_{\text{ВХ}} \\ J_{\text{ВЫХ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\text{Э11}} & Y_{\text{Э12}} \\ Y_{\text{Э21}} & Y_{\text{Э22}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\text{ВХ}} \\ U_{\text{ВЫХ}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: $J_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВХ}}$ – столбцевые матрицы токов и напряжений узлов входа; $J_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{ВЫХ}}$ – столбцевые матрицы токов и напряжений узлов выхода; $Y_{\text{Э11}}, Y_{\text{Э12}}, Y_{\text{Э21}}, Y_{\text{Э22}}$ – блоки эквивалентной матрицы узловой проводимости ($Y_{\text{Э}}$) относительно входа и выхода трансформатора.

Зная блоки $Y_{\text{Э}}$, из (1) находят четыре матрицы обобщенных параметров 2К-полюсника трансформатора (матрицу передачи):

$$\begin{aligned}
A_T &= -Y_{\text{Э21}}^{-1} \cdot Y_{\text{Э22}}; & B_T &= -Y_{\text{Э21}}^{-1}; \\
C_T &= Y_{\text{Э12}} - Y_{\text{Э11}} \cdot Y_{\text{Э21}}^{-1} \cdot Y_{\text{Э22}}; & D_T &= -Y_{\text{Э11}} \cdot Y_{\text{Э21}}^{-1}.
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} U_{\text{ВХ}} \\ I_{\text{ВХ}} \end{bmatrix} = [H_T] \cdot \begin{bmatrix} U_{\text{ВЫХ}} \\ I_{\text{ВЫХ}} \end{bmatrix},$$

где $H_T = \begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix}$ – матрица передачи трансформатора.

Так можно получить матрицу передачи любого трансформатора, например с соединением обмоток "звезда – треугольник" и "звезда – звезда с нулем". Как видно, в (2) входит обратная матрица $Y_{\text{Э21}}^{-1}$. Исследования показывают, что матрица $Y_{\text{Э21}}^{-1}$ – особенная, то есть она не имеет обратной матрицы (так как сумма элементов во всех строках равна нулю).

Чтобы избежать этого и найти $Y_{\text{Э21}}^{-1}$, можно незначительно изменить ее диагональные элементы. Например, умножив их на число k , мало отличающееся от единицы, тогда сумма строки не будет равна нулю.

Используя этот подход, для трансформаторов со схемами соединения обмоток "звезда – треугольник" и "звезда – звезда с нулем" выведены обобщенные параметры матриц передачи в аналитическом виде.

Для трансформатора "звезда - треугольник" в аналитическом виде получено:

$$\begin{aligned}
A_T &= \frac{Z_1}{Z_M \cdot (k^2 + k + 1)} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cdot k + 1 & -k + 1 & -k - 2 \\ -k - 2 & 2 \cdot k + 1 & -k + 1 \\ -k + 1 & -k - 2 & 2 \cdot k + 1 \end{bmatrix}; \\
B_T &= \frac{-\Delta}{Z_M \cdot (1 - k^3)} \cdot \begin{bmatrix} k^2 & k & 1 \\ 1 & k^2 & k \\ k & 1 & k^2 \end{bmatrix}; \\
C_T &= \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} g - Z_M + 2 \cdot g \cdot k & -g \cdot (k - 1) & Z_M - 2 \cdot g - g \cdot k \\ Z_M - 2 \cdot g - g \cdot k & g - Z_M + 2 \cdot g \cdot k & -g \cdot (k - 1) \\ -g \cdot (k - 1) & Z_M - 2 \cdot g - g \cdot k & g - Z_M + 2 \cdot g \cdot k \end{bmatrix}; \tag{3} \\
D_T &= \frac{Z_2}{3 \cdot Z_M \cdot (k^2 + k + 1)} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cdot k + 1 & -k + 1 & -k - 2 \\ -k - 2 & 2 \cdot k + 1 & -k + 1 \\ -k + 1 & -k - 2 & 2 \cdot k + 1 \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

где: $\Delta = Z_1 \cdot Z_2 - Z_M^2$;

$$g = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_M \cdot (k^2 + k + 1)};$$

$$k = 1,000001 \div 1,001.$$

Для трансформатора "звезда – звезда с нулем" в аналитическом виде получено:

$$\begin{aligned}
A_T &= \frac{-Z_1}{3 \cdot (k+1) \cdot k \cdot Z_M} \cdot \begin{pmatrix} -3 \cdot k - 2 & 1 & 1 & 3 \cdot k \\ 1 & -3 \cdot k - 2 & 1 & 3 \cdot k \\ 1 & 1 & -3 \cdot k - 2 & 3 \cdot k \\ k & k & k & -3 \cdot k \end{pmatrix}; \\
B_T &= \frac{\Delta}{3 \cdot (k^2 - 1) \cdot k \cdot Z_M} \cdot \begin{pmatrix} 3 \cdot k^2 - 2 & 1 & 1 & k \\ 1 & 3 \cdot k^2 - 2 & 1 & k \\ 1 & 1 & 3 \cdot k^2 - 2 & k \\ k & k & k & k^2 \end{pmatrix}; \\
C_T &= \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{pmatrix} -Z_M - g \cdot (4 \cdot k + 2) & -g \cdot (k - 1) & -g \cdot (k - 1) & Z_M + 6 \cdot g \cdot k \\ -g \cdot (k - 1) & -Z_M - g \cdot (4 \cdot k + 2) & -g \cdot (k - 1) & Z_M + 6 \cdot g \cdot k \\ -g \cdot (k - 1) & -g \cdot (k - 1) & -Z_M - g \cdot (4 \cdot k + 2) & Z_M + 6 \cdot g \cdot k \\ Z_M + 6 \cdot g \cdot k & Z_M + 6 \cdot g \cdot k & Z_M + 6 \cdot g \cdot k & -3 \cdot Z_M - 18 \cdot g \cdot k \end{pmatrix}; \\
D_T &= \frac{-Z_2}{3 \cdot (k+1) \cdot k \cdot Z_M} \cdot \begin{pmatrix} -3 \cdot k - 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -3 \cdot k - 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -3 \cdot k - 2 & 1 \\ 3k & 3k & 3k & -3k \end{pmatrix},
\end{aligned} \tag{4}$$

где: $\Delta = Z_1 \cdot Z_2 - Z_M^2$;

$$g = \frac{-Z_1 \cdot Z_2}{3 \cdot Z_M \cdot k \cdot (k+1)};$$

$$k = 1,000001 \div 1,001.$$

В (3)–(4) обозначены Z_1 , Z_2 , Z_M – собственные и взаимные сопротивления обмоток трансформатора.

Коэффициент (k) был выбран при исследовании различных режимов данного трансформатора. Это диапазон значений, при которых все напряжения и токи практически совпадают с необходимыми.

Приведенные выражения (3), (4) определяют матрицы передачи трансформаторов "звезда–треугольник" и "звезда–звезда с нулем" аналитически без необходимости обращения комплексной матрицы $Y_{\Sigma 21}$.

Рассмотренные трансформаторы в фидере 10 кВ связывают сети с разным количеством проводов. Следует отметить, что по методу фазных координат каждый проводник, а также нулевой можно называть фазой. Трансформатор "звезда–треугольник" связывает две трехфазные сети 35 (или 110 кВ) и 10 кВ, а трансформатор "звезда – звезда с нулем" – трехпроводную с четырехпроводной сетью (рисунок 1).

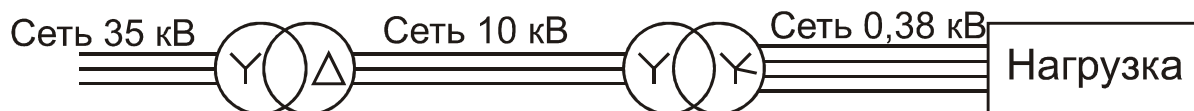


Рисунок 1 – Связь трехпроводной и четырехпроводной сети фидера 10 кВ

Матрица передачи трансформатора "звезда – звезда с нулем" имеет размерность 8x8, а матрица передачи сети 6-10 кВ имеет размерность 6x6. Это не дает возможности перемножения матриц передачи трансформатора 10/0,4 кВ и сети 6-10 кВ.

Для решения данной задачи необходимо найти связь между трехфазным входом трансформатора 35/10 кВ (начало фидера) и четырехпроводной нагрузкой (конец фидера).

Схема трансформатора "звезда - звезда с нулем" с прилегающей сетью представлена на рисунке 2.

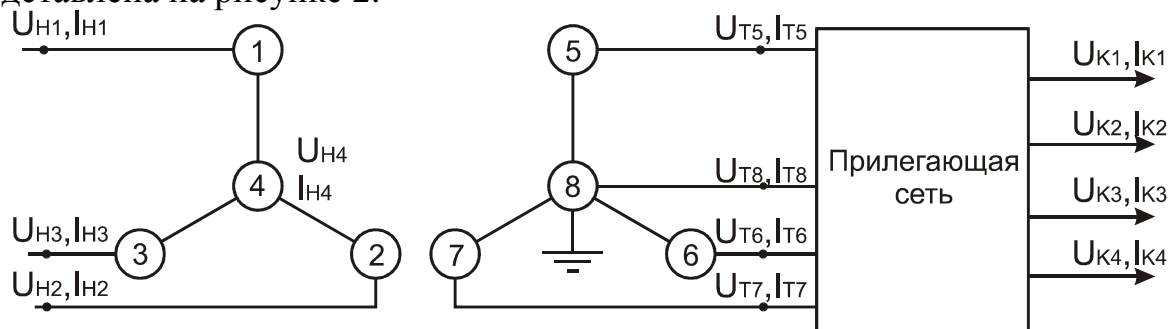


Рисунок 2 – Схема трансформатора "звезда - звезда с нулем" с прилегающей сетью

Найдем необходимую связь путем эквивалентирования трансформатора 10/0,4 кВ и прилегающей к нему сети 0,38 кВ. При этом используем два граничных условия:

- 1) ток в нейтрале (узел 4 на рисунке 2) равен нулю $I_{Н4} = 0$;
- 2) напряжение заземленной нейтрали (узел 8 на рисунке 2) равно нулю $U_{Т8} = 0$.

Составим структурную схему в виде 2K-полюсников трансформатора и прилегающей сети (рисунок 3).



Рисунок 3 – Структурная схема 2K-полюсников

На этом рисунке прилегающая сеть до трансформатора 10/0,4 кВ имеет матрицу передачи (A, B, C, D) , сам трансформатор имеет матрицу передачи (A_T, B_T, C_T, D_T) , а прилегающая сеть имеет матрицу передачи (AE, BE, CE, DE) .

В процессе упрощений и эквивалентирования получим эквивалентную матрицу передачи сети 35-10-0,38 кВ:

$$\begin{bmatrix} U_{1-3} \\ I_{1-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M8 & MB8 \\ L8 & LD8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{K1-3} \\ I_{K1-3} \end{bmatrix},$$

где U_{1-3}, I_{1-3} – напряжения и токи на входе трансформатора 35/10 кВ; U_{K1-3}, I_{K1-3} – напряжения и токи на выходе нагрузки; $M8, MB8, L8, LD8$ – обобщенные параметры эквивалентной матрицы передачи:

$$M8 = A \cdot (A_{T11} + B_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot C_{T21})) \cdot (AE_{11} + AE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot AE_{21})) + \\ + B \cdot (B_{T11} + B_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot D_{T21})) \cdot (CE_{11} + CE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot AE_{21}));$$

$$\begin{aligned}
MB8 &= A \cdot (A_{T11} + B_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot C_{T21})) \cdot (AE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot (BE_{21} + BE_{22} \cdot EI4)) + BE_{11} + BE_{12} \cdot EI4) + \\
&+ B \cdot (B_{T11} + B_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot D_{T21})) \cdot (CE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot (BE_{21} + BE_{22} \cdot EI4)) + DE_{11} + DE_{12} \cdot EI4); \\
L8 &= C \cdot (C_{T11} + D_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot C_{T21})) \cdot (AE_{11} + AE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot AE_{21})) + \\
&+ D \cdot (D_{T11} + D_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot D_{T21})) \cdot (CE_{11} + CE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot AE_{21})); \\
LD8 &= C \cdot (C_{T11} + D_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot C_{T21})) \cdot (AE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot (BE_{21} + BE_{22} \cdot EI4)) + BE_{11} + BE_{12} \cdot EI4) + \\
&+ D \cdot (D_{T11} + D_{T12} \cdot (-D_{T22}^{-1} \cdot D_{T21})) \cdot (CE_{12} \cdot (-AE_{22}^{-1} \cdot (BE_{21} + BE_{22} \cdot EI4)) + DE_{11} + DE_{12} \cdot EI4).
\end{aligned}$$

Здесь индексами 11, 12, 21, 22 обозначены блоки соответствующих матриц.

Задавая напряжения на входе трансформатора 35/10 кВ U_{1-3} и зная матрицы передачи всех элементов фидера, можем определить токи и напряжения в любых точках фидера.

Модель линии

Для получения матрицы передачи K -фазной линии электропередачи используют телеграфные уравнения и их решение в виде $2K$ -полюсника

$$\begin{pmatrix} [U_H] \\ [I_H] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} [U_K] \\ [I_K] \end{pmatrix},$$

где $[U_H]$, $[I_H]$, $[U_K]$, $[I_K]$ – столбцевые матрицы комплексных напряжений и токов в начале и конце линии длиной " L ", км; $[A]$, $[B]$, $[C]$, $[D]$ – обобщенные параметры короткой линии электропередачи, представленной П-образной схемой замещения.

$$A = E + ZY; \quad B = Z;$$

$$C = 2Y + YZY; \quad D = E + YZ,$$

где E – единичная матрица ($K \times K$), где K – количество фаз линии; Z – матрица собственных и взаимных продольных сопротивлений фаз линии ($K \times K$); Y – матрица собственных и взаимных поперечных проводимостей фаз линии ($K \times K$).

Модель фильтров

Для фильтров напряжения обратной и нулевой последовательности составляются матрицы узловых проводимостей на основе их схем. После эквивалентирования матрицы (исключения промежуточных узлов, в которых токи равны нулю) относительно узлов, подключенных к сети, получают эквивалентное матричное уравнение

$$[J_{ВХ}] = [Y_{ЭФ}] \cdot [U_{ВХ}],$$

где $J_{ВХ}$, $U_{ВХ}$ – столбцевые матрицы токов и напряжений в узлах входа фильтра подключенных к сети; $[Y_{ЭФ}]$ – эквивалентная матрица проводимости фильтра.

Матрица передачи фильтра будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} U_{НФ} \\ I_{НФ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{Ф} & B_{Ф} \\ C_{Ф} & D_{Ф} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{КФ} \\ I_{КФ} \end{pmatrix},$$

где $A_{Ф} = [E]$; $B_{Ф} = [0]$; $C_{Ф} = [Y_{ЭФ}]$; $D_{Ф} = [E]$ – обобщенные параметры матрицы передачи фильтра; $[E]$ – единичная матрица; $[0]$ – нулевая матрица.

Модель нагрузки

Для получения матрицы передачи нагрузки, соединенной в звезду составляется матрица узловых проводимостей:

$$Y_N = \begin{bmatrix} Y_{N1} & 0 & 0 & -Y_{N1} \\ 0 & Y_{N2} & 0 & -Y_{N2} \\ 0 & 0 & Y_{N3} & -Y_{N3} \\ -Y_{N1} & -Y_{N2} & -Y_{N3} & Y_{N1} + Y_{N2} + Y_{N3} \end{bmatrix}.$$

Матрица передачи нагрузки $[H_N]$ равна:

$$[H_N] = \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix},$$

где обобщенные параметры матрицы передачи нагрузки равны:

$$\begin{aligned} [A_N] &= [E]; & [B_N] &= [0]; \\ [C_N] &= [Y_N]; & [D_N] &= [E], \end{aligned}$$

где $[E]$ – единичная матрица; $[0]$ – нулевая матрица; $[Y_N]$ – матрица узловых проводимостей нагрузки.

Модель статических характеристик нагрузки

Если необходимо учесть зависимость мощности нагрузки (S) от напряжения (U), то можно использовать статические характеристики нагрузки (СХН), как одинаковые для всех фаз при симметричном режиме, так и разные для всех фаз при несимметричном режиме:

$$S = P(U) + jQ(U).$$

Здесь $P(U)$ и $Q(U)$ являются функциями от напряжения, обычно это квадратичные функции:

$$\begin{aligned} P(U) &= a_P U^2 + b_P U + c_P; \\ Q(U) &= a_Q U^2 + b_Q U + c_Q, \end{aligned}$$

где $a_P, b_P, c_P, a_Q, b_Q, c_Q$ – коэффициенты статических характеристик нагрузки.

В работе рассмотрены два вида СХН для симметричной и несимметричной нагрузки, в состав которой входят различные типы нагрузки, в том числе с преобладанием асинхронных двигателей.

Модель несимметрии

При моделировании блока несимметрии он заменяется эквивалентной "П"-образной схемой замещения в матричном виде. В схему входят матрица продольных сопротивлений Z_{KZ} и матрицы поперечных проводимостей в начале Y_{KZ1} и в конце Y_{KZ2} блока.

В этом случае матрица передачи будет иметь вид:

$$[H_{KZ}] = \begin{bmatrix} A_{KZ} & B_{KZ} \\ C_{KZ} & D_{KZ} \end{bmatrix},$$

где обобщенные параметры матрицы передачи определяются как:

$$A_{KZ} = E + Z_{KZ} \cdot Y_{KZ2}; \quad B_{KZ} = Z_{KZ};$$

$$C_{KZ} = Y_{KZ1} + Y_{KZ2} + Y_{KZ1} \cdot Z_{KZ} \cdot Y_{KZ2}; \quad D_{KZ} = E + Y_{KZ1} \cdot Z_{KZ}.$$

Параметры Z_{KZ} , Y_{KZ1} , Y_{KZ2} определяются для каждого вида аварийного режима через поперечные проводимости (различные КЗ фаз) и продольные сопротивления (различные обрывы фаз).

Модель отпайки

Моделирование фидера 10 кВ с отпайкой представляется в виде модели, где отпайка представлена как поперечная проводимость (Y_Y). Тогда матрица передачи отпайки будет иметь вид:

$$\begin{aligned} A_Y &= [E]; & B_Y &= [0]; \\ C_Y &= [Y_Y]; & D_Y &= [E]. \end{aligned}$$

Эквивалентная модель фидера

После определения матриц передачи каждого элемента сети рассчитывается эквивалентная матрица передачи всей сети (H_{Σ}). При этом матрицы передачи (H_i) последовательно соединенных n -элементов перемножаются.

$$H_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n H_i.$$

В третьей главе "Исследование несимметричных аварийных квазиустановившихся режимов распределительных сетей 10 кВ" проведена оценка влияния основных параметров фидеров 10 кВ на расчеты несимметричных аварийных режимов фидера.

Разработана математическая модель фидера 10 кВ, включающая в себя: силовой трансформатор 35/10 или 110/10 кВ с соединением обмоток "звезда-треугольник" (ГТ), силовой трансформатор 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток "звезда-звезда с нулем" (НТ), измерительный трансформатор (ИТ), участки линии электропередачи (Л1, Л2), нагрузка на стороне 0,4 кВ (Н), фильтры напряжения обратной (Ф0) и нулевой (Фн) последовательности, блок самой несимметрии (БН) (рисунок 4).

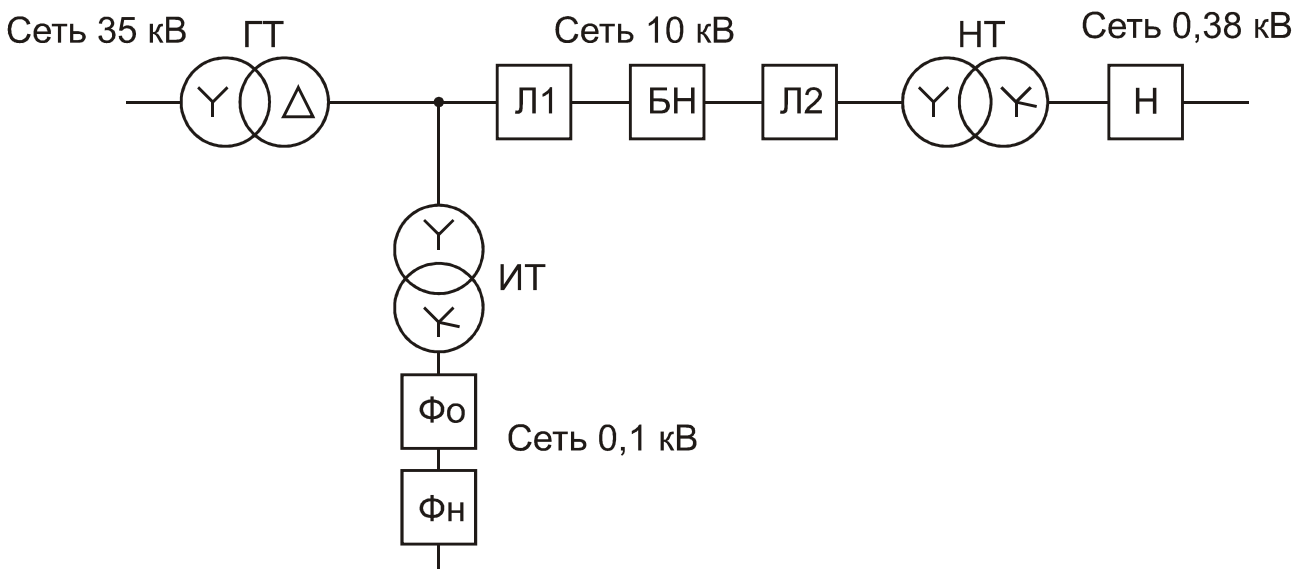


Рисунок 4 – Схема модели исследуемой сети

Исследованы следующие параметры, влияющие на несимметричные аварийные режимы фидеров:

- параметры линии электропередачи;
- мощность нагрузки;
- тангенс угла нагрузки;
- значение переходного сопротивления;
- параметры трансформаторов;
- статические характеристики нагрузки.

Для анализа влияния параметров линии электропередачи были рассчитаны отклонения токов и напряжений при исключении взаимных индуктивных сопротивлений линии, а также исключении емкостных проводимостей линии по формуле:

$$d = \frac{f1 - f2}{f1} \cdot 100\% ,$$

где d – отклонение величины, %; $f1$ – значения фазных токов или напряжений при учете взаимных индуктивных сопротивлений и емкостных проводимостей линии; $f2$ – значения фазных токов или напряжений при исключении взаимных индуктивных сопротивлений или емкостных проводимостей линии.

Установлено, что при неучете взаимных индуктивных сопротивлений линии отклонения токов и напряжений составили (8,9 – 10,7) % относительно полного учета всех параметров линии.

Учет емкостных проводимостей линии уточняет рассчитанные параметры работы фидера 10 кВ в среднем на 0,15%.

Исследовано влияние мощности нагрузки на параметры аварийных несимметричных режимов. Наибольшее воздействие изменения мощности нагрузки (с 2250 кВА до 250 кВА) оказало на величину тока вдоль линии. При изменении полной мощности нагрузки потребителя, значительно изменяются токи в нормальном режиме, при обрыве фазного провода и при замыкании фазы на землю.

Проведен анализ влияния тангенса угла нагрузки на параметры аварийных режимов. Установлено, что максимальное отклонение токов составило 6,76%, которое наблюдалось при изменении тангенса угла нагрузки в диапазоне 0,1 – 0,9.

Предложена методика расчета аварийных несимметричных режимов с учетом переходного сопротивления. Расчеты проведены для всех видов КЗ при различных длинах линий (10-30 км), различных местах произошедших КЗ (начало, середина, конец фидера), а также при различных переходных сопротивлениях ($R_{\text{ПЕР}} = 0,001 \div 10000$ Ом). Показано, что если $R_{\text{ПЕР}}$ неизвестно точно, то при расчетах можно ограничиться всего двумя случаями: 1) металлическое короткое замыкание, при этом $R_{\text{ПЕР}} = 0,1$ Ом; 2) замыкание через переходное сопротивление, при этом $R_{\text{ПЕР}} = 500$ Ом. Данное положение значительно облегчает задачу разработчиков. Если $R_{\text{ПЕР}}$ известно точно, то при расчетах необходимо принимать это известное значение сопротивления.

Для исследования влияния параметров трансформаторов на режимы фидеров 10 кВ были выбраны 4 силовых трансформатора 35/10 кВ мощностью 4000, 2500, 1600 и 1000 кВА и 3 силовых трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 2500, 1600, 1000 кВА. При замене трансформатора 35/10 кВ мощностью 4000 кВА на трансформаторы мощностью 2500, 1600 и 1000 кВА наблюдается снижение фазных напряжений и токов, а также напряжений на ФНОП и ФННП до 2,7%. Уменьшение мощности трансформатора 35/10 кВ повлияло на расчетные аварийные токи при междуфазном КЗ, трехфазном КЗ и двойном замыкании на землю (ДЗЗ), что привело к снижению токов в поврежденных фазах на 44-47%. Влияние параметров трансформатора 10/0,4 кВ менее существенно, нежели параметров трансформаторов 35/10 кВ. Во всех рассмотренных аварийных и нормальном режимах отклонения фазных напряжений и токов составили менее 2%.

Исследовано влияние статических характеристик нагрузок на параметры симметричных и несимметричных режимов. Установлено, что их учет уточняет значения фазных токов до 7%. Примеры расчета токов I_A , I_B , I_C (рисунок 5а) и напряжений U_A , U_B , U_C в начале фидера (рисунок 5б), а также напряжений на ФНОП $U_{\text{ФНОП}}$ и ФННП $U_{\text{ФННП}}$ (рисунок 5в) приведены на рисунке 5 при перемещении точки повреждения вдоль длины линии (L).

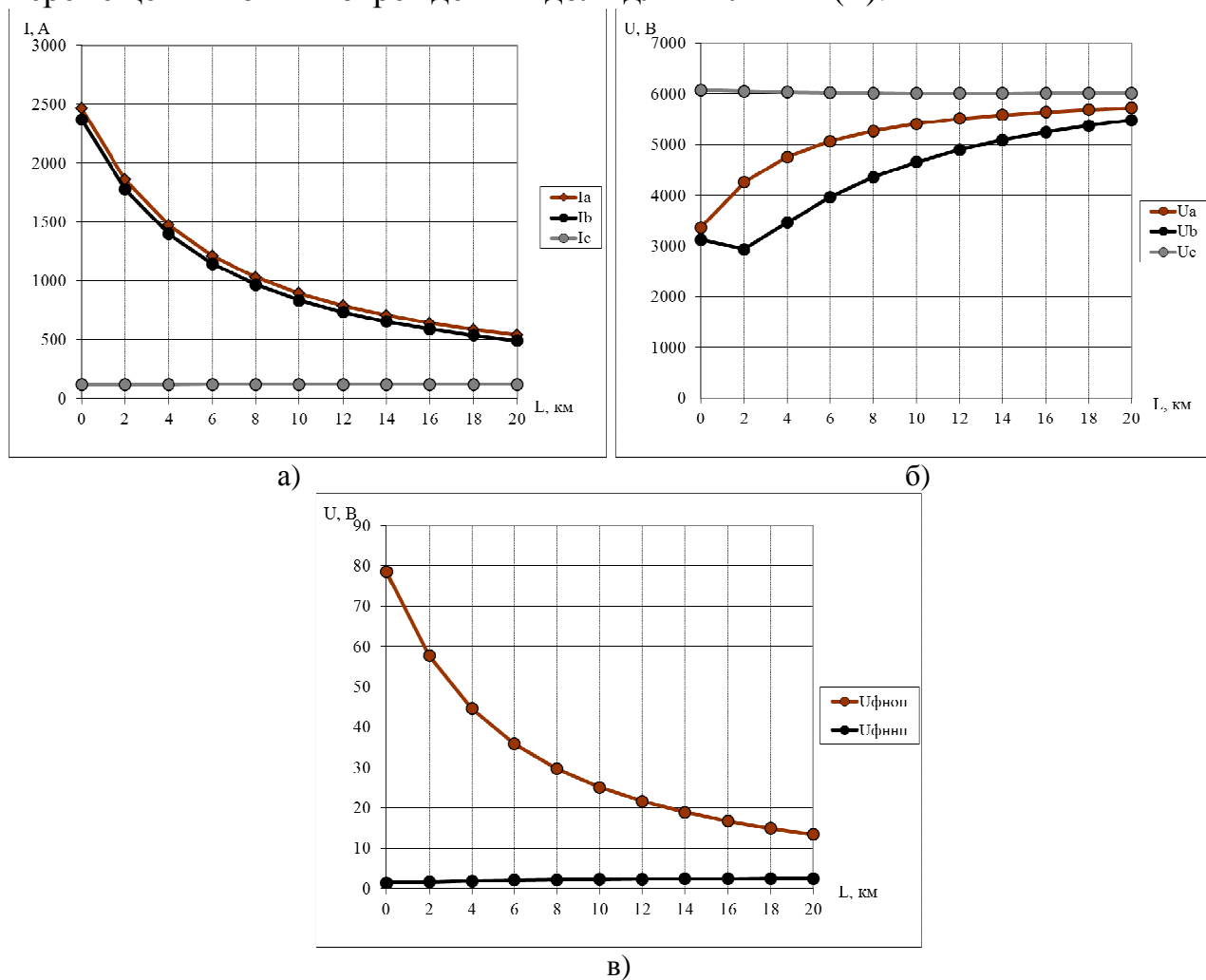


Рисунок 5 – Параметры аварийного режима в зависимости от места возникновения двухфазного КЗ А–В

Аналогичные зависимости были рассчитаны и проанализированы для всех видов аварийных режимов.

В четвертой главе "Разработка информационно-поисковой системы по обнаружению вида и места аварийного режима в фидере 10 кВ" представлены результаты анализа возможности определения места и вида повреждения.

В таблице 1 приведены соотношения напряжений и токов, определяющие режим фидера при всех видах повреждений.

Из таблицы 1 видно, что вид повреждения по параметрам аварийного режима определяется однозначно.

Для определения диапазона удаленности повреждения от начала линии при всех заданных параметрах фидера (параметры трансформаторов, параметры линии, величина переходного сопротивления, мощность и тангенс угла нагрузки, вид СХН) также можно использовать расчетные значения фазных токов и напряжений, а также напряжений на фильтрах ФНОП и ФННП.

Чтобы получить значения токов и напряжений не только в расчетных точках, но и между ними, для каждой фазы можно определить интерполяционный полином, параметры которого (для удобства вычислений системы уравнений в матричном виде) вычисляются через обратную матрицу Вандермонда.

Таблица 1 – Определение вида повреждения по параметрам аварийного режима

Вид повреждения	Параметры, определяющие режим		
	напряжения	токи	напряжения на фильтрах
1	2	3	4
1. Однофазное замыкание на землю	Напряжение в одной поврежденной фазе $\leq 20\% \text{ от } U_{\text{НОМ}}$		Напряжение на ФННП $\geq 52 \text{ В}$
	Напряжения в 2-х неповрежденных фазах $\geq (1,3 \div 1,5) \cdot U_{\text{НОМ}}$		
2. Междофазное короткое замыкание	Напряжения 2-х поврежденных фаз $\leq 0,95 \cdot U_{\text{НОМ}}$ и $\geq 0,5 U_{\text{НОМ}}$	Токи 2-х поврежденных фаз $\geq 4 \cdot I_{\text{НОМ}}$	Напряжение на ФНОП $\geq 13 \text{ В}$
3. Трехфазное короткое замыкание	Напряжения в 3-х поврежденных фазах $\leq 0,95 \cdot U_{\text{НОМ}}$	Токи в 3-х поврежденных фазах $\geq 4 \cdot I_{\text{НОМ}}$	
4. Обрыв фазного провода	Напряжение одной поврежденной фазы $\geq U_{\text{НОМ}}$	Ток одной поврежденной фазы $\leq 1 \text{ А}$	Напряжение на ФННП $> 0,1$ и $< 32 \text{ В}$
	Напряжения 2-х неповрежденных фаз $\leq U_{\text{НОМ}}$		
5. Обрыв перед замыканием на землю фазного провода	Напряжение 1-го поврежденного провода $\geq U_{\text{НОМ}}$	Ток 1-го поврежденного провода $\leq 1 \text{ А}$	Напряжение на ФННП $\leq 30 \text{ В}$
	Напряжения 2-х неповрежденных фаз $\leq U_{\text{НОМ}}$		

1	2	3	4
6. Обрыв после замыкания на землю фазного провода	Напряжение 1-й поврежденной фазы $\leq 0,2 \cdot U_{\text{НОМ}}$	Ток 1-го поврежденного провода $\leq 1 \text{ А}$	Напряжение на ФННП $\geq 60 \text{ В}$
	Напряжения 2-х неповрежденных фаз $> (1,3 \div 1,5) \cdot U_{\text{НОМ}}$		
7. Двойное замыкание на землю фаз	Напряжения 2-х поврежденных фаз $\leq 0,8 \cdot U_{\text{НОМ}}$ и $\geq 0,05 \cdot U_{\text{НОМ}}$	Токи 2-х поврежденных фаз $\geq 4 \cdot I_{\text{НОМ}}$	Напряжение на ФНОП $\geq 13 \text{ В}$
	Напряжения 1-й неповрежденной фазы $\geq 1,4 U_{\text{НОМ}}$		Напряжение на ФННП $\geq 26 \text{ В}$

Приведем пример определения возможного диапазона удаленности от начала линии междуфазного короткого замыкания фаз А-В, например по фазному напряжению поврежденной фазы А. Класс точности измеряемого вольтметра примем равным 0,2 или погрешности вычислений.

Задаются вектор-столбцы расстояний (L) и значений напряжений (U_A) для каждой расчетной точки (приведены транспонированные матрицы):

$$L^T = [0 \quad 2 \quad 4 \quad 6 \quad 8 \quad 10 \quad 12 \quad 14 \quad 16 \quad 18 \quad 20];$$

$$U_A^T = [3360 \quad 4257 \quad 4762 \quad 5069 \quad 5270 \quad 5410 \quad 5511 \quad 5587 \quad 5644 \quad 5689 \quad 5724].$$

Рассчитывается матрица Вандермонда:

$$A_{i,j} = (L_i)^{n-j},$$

где A – матрица Вандермонда, размерностью n на n ; L_i – i -й элемент вектор-столбца L , м; n – количество расчетных точек; i – индекс строки матрицы (изменяется от 1 до n); j – индекс столбца матрицы (изменяется от 1 до n).

Определяются коэффициенты полинома:

$$z = A^{-1} \cdot U_A,$$

где z – коэффициенты полинома; A^{-1} – обратная матрица Вандермонда; U_A – вектор-столбец значений напряжений, В.

Уравнение полинома имеет вид:

$$P(x) = \sum_{k=1}^n (z_k \cdot x^{n-k}),$$

где $P(x)$ – уравнение полинома; z_k – коэффициенты полинома; x – координата по оси L , м.

Для приведенного примера полином равен:

$$P(x) = 1,36 \cdot 10^{-9} \cdot x^{10} - 1,32 \cdot 10^{-7} \cdot x^9 + 5,08 \cdot 10^{-6} \cdot x^8 - 8,44 \cdot 10^{-5} \cdot x^7 - 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot x^6 + 0,037 \cdot x^5 - 0,826 \cdot x^4 + 10,672 \cdot x^3 - 94,004 \cdot x^2 + 599,637 \cdot x + 3,36 \cdot 10^3.$$

Этот полином пройдет через все заданные точки значений напряжений U_A . Аналогично можно определить полиномы для всех необходимых расчетных значений напряжений и токов. Допустим, что эти значения токов и напряжений будут измеряться приборами с классами точности K , тогда определим пределы допустимой абсолютной основной погрешности измеряемого прибора или

точности расчета:

$$\Delta = \frac{K \cdot N}{100},$$

где Δ – предел допускаемой абсолютной основной погрешности; K – класс точности, %; N – нормирующее значение, В.

Определяем максимальную и минимальную границы измеренных (или расчетных) величин, например U :

$$U_i' = U_i + \Delta;$$

$$U_i'' = U_i - \Delta,$$

где U_i' , U_i'' – верхняя и нижняя границы погрешности измеренной (или расчетной) величины соответственно; U_i – значение измеренной величины.

Для повышения точности измеренных параметров лучше всего использовать фиксирующие амперметры и вольтметры.

Решив уравнение многочлена $P(x)$ относительно U_i' и U_i'' , получим значения x_i' и x_i'' , соответствующие границам диапазона (интервала) определения места повреждения (пример представлен в таблице 2). Длина участка, на котором произошло повреждение (dL), определяется разностью границ x_i' и x_i'' , то есть $dL = x_i' - x_i''$. Для примера, в таблице 2 приведены границы интервалов, в котором возможно произошло двухфазное короткое замыкание А-В.

Таблица 2 – Границы интервала возможного междуфазного короткого замыкания А-В

L_i , км	U_{Ai} , В	x_i' , км	x_i'' , км	dL , км
0	3360,111	0,04	0	0,04
2	4256,688	2,074	1,928	0,146
4	4761,965	4,127	3,877	0,249
6	5069,418	6,201	5,807	0,393
8	5270,767	8,298	7,717	0,581
10	5410,31	10,423	9,604	0,819
12	5511,219	12,578	11,466	1,112
14	5586,57	14,771	13,301	1,47
16	5644,217	17,008	15,104	1,903
18	5689,138	19,306	16,871	2,434
20	5724,624	21,452	18,6	2,852

Таким образом, по фазным напряжениям поврежденной фазы найден интервал длин, на котором возможно произошло междуфазное короткое замыкание. Например, в середине фидера (при удаленности 10 км от трансформатора 35/10 кВ) длина такого участка составит примерно 819 м от расстояния 9,6 км до 10,4 км.

Таким образом, для каждого вида повреждения по напряжениям и токам для поврежденных и неповрежденных фаз можно определить начальные и конечные точки интервала (x_i' и x_i'').

Не все отдельные параметры аварийных режимов четко реагируют на удаленность того или иного вида повреждения. Однако, их совместные значения позволяют уточнить интервал и дать его пределы.

По результатам исследования предложена возможная информационно-поисковая система для поиска вида и места повреждения, состоящая из программы расчета на ЭВМ, базы данных, измерительных приборов, средств передачи измеренных величин. Исходными данными к программе являются "общие данные", по которым рассчитывается "база данных".

К "общим данным" относятся: номер фидера, название фидера, параметры трансформатора 35/10 кВ, параметры трансформатора 10/0,4 кВ, параметры ЛЭП (длина, сечение проводов, размещение на опоре), классы точности измерительных приборов (вольтметров в начале, амперметров в начале и вольтметров на ФНОП и ФННП), вид статической характеристики нагрузки (параметры a , b , c), переходное сопротивление, шаг вдоль длины линии, с которым рассчитываются параметры аварийных режимов.

После задания диспетчером "общих данных" фидера программа рассчитывает "базу данных" к этому фидеру.

К "базе данных" относятся: токи в начале (I_A , I_B , I_C), напряжения в начале (U_A , U_B , U_C), напряжение на ФНОП ($U_{\text{ФНОП}}$), напряжение на ФННП ($U_{\text{ФННП}}$), "название события" (вид произошедшего аварийного режима), начальное (x') и конечное (x'') значение интервала, в котором произошло данное повреждение.

На фидере устанавливаются: три цифровых фиксирующих амперметра (измеряющих I_A' , I_B' , I_C'); три цифровых фиксирующих вольтметра (измеряющих U_A' , U_B' , U_C'); два цифровых фиксирующих вольтметра (измеряющих $U_{\text{ФНОП}'}$ и $U_{\text{ФННП}'}$).

Данные приборы через соответствующие передающие каналы связи (мобильную связь, контроллеры с мобильной связью GPRS и др.) передают свои показания на компьютер диспетчера с заданным интервалом времени (например, $\Delta t \approx 0,1$ сек). Эти показания (I_A' , I_B' , I_C' , U_A' , U_B' , U_C' , $U_{\text{ФНОП}'}$, $U_{\text{ФННП}'}$) сверяются с рассчитанной базой данных (I_A , I_B , I_C , U_A , U_B , U_C , $U_{\text{ФНОП}}$, $U_{\text{ФННП}}$). При их совпадении с заданной точностью (ε), то есть когда выполняются все условия:

$$\frac{|I_A - I_A'|}{I_A} \leq \varepsilon \text{ and } \frac{|I_B - I_B'|}{I_B} \leq \varepsilon \text{ and } \frac{|I_C - I_C'|}{I_C} \leq \varepsilon \text{ and}$$

$$\frac{|U_A - U_A'|}{U_A} \leq \varepsilon \text{ and } \frac{|U_B - U_B'|}{U_B} \leq \varepsilon \text{ and } \frac{|U_C - U_C'|}{U_C} \leq \varepsilon \text{ and}$$

$$\frac{|U_{\text{ФНОП}} - U_{\text{ФНОП}'}}{U_{\text{ФНОП}}} \leq \varepsilon \text{ and } \frac{|U_{\text{ФННП}} - U_{\text{ФННП}'}}{U_{\text{ФННП}}} \leq \varepsilon.$$

Программа выбирает произошедшее "событие" и выдает сообщение, например: произошло КЗ фаз А-В на интервале 1,96 до 2,03 км от начала фидера.

Если условия выполняются для нескольких "событий", то диспетчеру сообщаются все эти события.

Вид "общих данных" фидера и вид его "базы данных" представлены в таблице 3.

Такие базы данных (только полные для всех точек вдоль линии и всех возможных аварийных режимов) рассчитываются для всех необходимых фидеров, где будут установлены указанные приборы измерения (амперметры, вольтметры). То есть, в информационно-поисковую систему могут входить не все, а лишь самые ответственные фидера.

Для проверки принятых моделей линии, трансформатора 10/0,4 кВ, ФНОП и ФННП, блока несимметрии был собран лабораторно-исследовательский стенд, состоящий из: двух участков трехфазной четырехпроводной линии, трех однофазных трансформаторов, нагрузки, фильтра напряжения обратной последовательности, фильтра напряжения нулевой последовательности, блока несимметрии.

Таблица 3 – Пример общих данных и базы данных фидера

номер фидера, название фидера, параметры трансформатора 35/10 кВ, параметры трансформатора 10/0,4 кВ, параметры ЛЭП (длина, сечение проводов, размещение на опоре)						классы точности измерительных приборов (вольтметров в начале, амперметров в начале и вольтметров на ФНОП и ФННП), вид статической характеристики нагрузки (параметры а, b, с), шаг расчетов вдоль длины линии				
металлическое КЗ ($R_{ПЕР}=0,1 \text{ Ом}$)										
Напряжения в начале, В			Токи в начале, А			Напряжения на фильтрах, В		Событие	x' , км	x'' , км
U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	$U_{\text{ФНОП}}$	$U_{\text{ФННП}}$			
440,1	10329,3	10477,6	114,4	116,3	116,3	3,232	58,007	ОЗЗ фаза А	7,61	8,39
4256,7	2937,4	6051,7	1858,1	1776,4	116,0	57,722	1,615	КЗ А-В	1,96	2,03
4936,4	4991,4	4666,8	737,4	803,3	774,7	1,112	1,736	КЗ А-В-С	13,85	14,15
8509,9	5732,5	5213,4	0,143	100,5	100,4	3,956	21,698	Обрыв фаза А	5,88	6,12
...
4243,5	3889,7	8992,2	784,3	729,8	118,2	21,492	27,953	ДЗЗ А-В-0	11,87	12,13

Параметры указанного стенда были внесены в программу расчета несимметричных аварийных режимов. Были рассчитаны и измерены следующие виды режимов: нормальный режим; замыкание каждой фазы на землю; однофазные короткие замыкания А-Н, В-Н, С-Н; междуфазные короткие замыкания А-В, А-С, В-С; трехфазное короткое замыкание А-В-С; обрывы фазных проводов.

Результаты исследований показали, что расчетные и измеренные фазные напряжения отличаются до 7%, линейные напряжения отличаются до 2%, фазные токи отличаются до 1-5%, напряжения на фильтрах – до 20%. Проведенные эксперименты подтверждают правильность принятых в главе 2 моделей элементов фидера.

Таким образом, можно определить вид и место аварийного несимметричного режима фидера 10 кВ с помощью предложенной информационно-поисковой системы, которая состоит из: программы расчета, базы данных фидера по токам и напряжениям во всех режимах, измерительных приборов и средств передачи измерений. Расчетная программа располагается на компьютере диспетчера, а приборы измерения и средства передачи – в начале фидера. После получения измеренных величин токов и напряжений программа сравнивает их с базой данных и определяет вид и место несимметрии, о чем сообщается на мониторе диспетчера (например: "произошло двухфазное КЗ А-В в интервале длин от 1,96 до 2,03 км"; токи в начале фидера $I_A = 1858$ А, $I_B = 1776$ А, $I_C = 116$ А; напряжения в начале фидера $U_A = 4256$ В, $U_B = 2937$ В, $U_C = 6051$ В; $U_{\text{ФНОП}} = 57,7$ В; $U_{\text{ФННП}} = 1,6$ В). Оценка результатов расчетов показала, что аварийные режимы можно определить с точностью 200–500 м.

Проведен расчет технико-экономической эффективности применения предложенной информационно-поисковой системы. По результатам исследований подана заявка на полезную модель "Способ определения вида и места повреждения линий электропередачи класса 10 кВ с изолированной нейтралью" и присвоен регистрационный номер №2012100578.

Таким образом, предложенный способ ОМП позволяет определить основные аварийные несимметричные режимы фидеров 10 кВ с достаточной для практического применения точностью, а также получить годовой экономический эффект порядка 26,5 тыс. рублей в расчете на один фидер, что при 42 фидерах РЭС "Островский" Костромской области составит 1,1 млн. рублей в год.

Основные выводы

1. Разработаны универсальная расчетная модель и программа расчета квазиустановившихся аварийных режимов фидеров 10 кВ в фазных координатах, позволяющие учитывать параметры трансформаторов, линий, фильтров, нагрузки и блока несимметрии.

2. Разработаны аналитические модели трансформаторов со схемами соединения обмоток "звезда–треугольник" (35/10 кВ) и "звезда–звезда с нулем" (10/0,4 кВ), позволяющие при расчете режимов отказаться от использования сложных процедур обращения комплексных матриц. Разработана аналитическая модель фидера, позволяющая вести совместный расчет сетей 10 и 0,38 кВ.

3. Выявлены особенности влияния на аварийные режимы основных параметров фидеров 10 кВ: индуктивных сопротивлений и емкостных проводимостей линии, мощности и тангенса угла нагрузки, переходного сопротивления в месте повреждения, параметров трансформаторов, статических характеристик нагрузок, ответвлений от линии. Показано, что

исследуемые параметры ведут к уточнению расчетов до 3-10%, что необходимо учитывать в расчетной модели фидера. Показано, что если переходное сопротивление в месте повреждения неизвестно точно, то можно использовать два его значения: 0,1 Ом при металлическом замыкании и 500 Ом при замыкании через переходное сопротивление, что облегчает задачу расчета.

4. Разработана методика, позволяющая определить как вид режима по предложенным в работе критериям, так и диапазон удаленности места повреждения, рассчитываемый с использованием интерполяционных функций параметров режимов.

5. Разработана информационно-поисковая система определения вида и места повреждения на основе сравнения измеренных и расчетных величин, соответствующих данному аварийному режиму. Установлено, что данная система позволяет определить место повреждения с достаточной для практики точностью, а также получить существенный годовой экономический эффект порядка 26,5 тыс. рублей в расчете на один фидер, что, например при 42 фидерах РЭС "Островский" Костромской области, составит 1,112 млн. рублей в год.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Баранов, А.А. Учет статических характеристик нагрузок при расчете несимметричных режимов фидеров 6–10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва, 2011. – Вып. 2. – С.4–6.
2. Баранов, А.А. Влияние переходного сопротивления на аварийные несимметричные режимы фидеров 10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва, 2011. – Вып. 9. – С.13–14.
3. Солдатов, В.А. Аналитическая модель трансформаторов "звезда–треугольник" и "звезда–звезда с нулем" в фазных координатах [Текст] / В.А. Солдатов, А.А. Баранов // Достижения науки и техники АПК. – Москва, 2011. – Вып. 1. – С.76–79.
4. Баранов, А.А. Определение вида и места несимметрии в фидере 10 кВ с ответвлением [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Труды Костромской ГСХА. – Кострома, 2008. – Вып. 68. – С. 194–199.
5. Баранов, А.А. Расчет и обнаружение возможных видов несимметрии в сетях 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Материалы 59-ой международной научно-практической конференции. – Кострома, КГСХА, 2008. – Т.5. – С.154–155.
6. Баранов, А.А. Влияние мощности нагрузки на определение вида и места несимметрии [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 60-й Международной научно-практической конференции. – Кострома, 2009. – Т.3. – С. 170–171.
7. Баранов, А.А. Влияние мощности нагрузки на определение вида и места несимметрии в фидере 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Труды Костромской ГСХА. – Кострома, 2009. – Вып. 71. – С. 118–127.

8. Баранов, А.А. Влияние тангенса угла нагрузки на определение вида и места несимметрии в фидере 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Труды Костромской ГСХА. – Кострома, 2009. – Вып. 71. – С. 127–132.
9. Баранов, А.А. Влияние тангенса угла нагрузки на определение вида и места несимметрии в фидере 0,4 кВ [Текст] / А.А. Баранов // Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 61-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2010. – Т.2. – С. 167.
10. Баранов, А.А. Влияние мощности нагрузки на определение вида и места несимметрии в фидере 0,4 кВ [Текст] / А.А. Баранов // Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 61-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2010. – Т.2. – С. 168.
11. Солдатов, В.А. Аналитические выражения для матрицы передачи трансформатора "звезда – треугольник" [Текст] / В.А. Солдатов, А.А. Баранов // Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 61-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2010. – Т.2. – С. 182–184.
12. Солдатов, В.А. Аналитические выражения для матрицы передачи трансформатора "звезда – звезда с нулем" [Текст] / В.А. Солдатов, А.А. Баранов // Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 61-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2010. – Т.2. – С. 184–185.
13. Баранов, А.А. Учет статических характеристик нагрузок при расчете симметричных режимов электрических сетей 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Кострома: КГСХА, 2010. – Выпуск 72. – С.180–186.
14. Баранов, А.А. Учет статических характеристик нагрузок при расчете несимметричных режимов электрических сетей 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Кострома: КГСХА, 2010. – Выпуск 72. – С. 186–196
15. Баранов, А.А. Влияние параметров линии в модели расчета несимметричных аварийных режимов фидеров 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов // Актуальные проблемы науки в АПК: Сборник статей 62-й международной научно-практической конференции в трех томах. – Кострома, 2011. – Т.2. – С. 130–132.
16. Баранов, А.А. Влияние переходного сопротивления на аварийные несимметричные режимы фидеров 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов, В.А. Солдатов // Актуальные проблемы науки в АПК: Сборник статей 62-й международной научно-практической конференции в трех томах. – Кострома, 2011. – Т.2. – С. 133–135.
17. Баранов, А.А. Влияние взаимных индуктивных сопротивлений и емкостных проводимостей линии в модели расчета несимметричных аварийных режимов фидеров 6-10 кВ [Текст] / А.А. Баранов // Труды Костромской

- государственной сельскохозяйственной академии.– Кострома: КГСХА, 2011.
– Выпуск 74. – С. 128–135.
18. Солдатов, В.А. Статические характеристики асинхронного двигателя [Текст] / В.А. Солдатов, С.А. Коновалов, А.А. Баранов // Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 62-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2011. – Т.2. – С. 191–193.
19. Баранов, А.А. Эквивалентирование трансформатора "звезда – звезда с нулем" и прилегающей сети в фазных координатах [Текст] / Баранов А.А., Солдатов В.А. // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 63-й международной научно-практической конференции в трех томах. – Кострома, 2012. – Т.2. – С. 151–155.
20. Баранов, А.А. Влияние пофазно различной нагрузки на несимметричные аварийные режимы фидеров 10 кВ [Текст] / Баранов А.А., Солдатов В.А. // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 63-й международной научно-практической конференции в трех томах. – Кострома, 2012. – Т.2. – С. 155–157.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" 156530, Костромская обл., Костромской район, пос. Караваево, уч. городок, КГСХА
Лицензия на издательскую деятельность ЛР №021292. Выдана 18/06/98

Компьютерный набор. Подписано в печать 24/01/2012.
Заказ №016. Формат 84x60/16. Тираж 100 экз. Усл.
печ. л. 1,00. Бумага офсетная. Отпечатано 24/01/2012.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в
академической типографии на цифровом дубликаторе.
Качество соответствует предоставленным оригиналам.

