

МИНОБРНАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

МУРЗИНА ЕКАТЕРИНА АНДРЕЕВНА



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ**

Выпускная квалификационная работа
на соискание степени бакалавра техники и технологии

Руководитель: Шуин В.А., д.т.н., проф.



Иваново 2012

АННОТАЦИЯ

Электромагнитные переходные процессы при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-10 кВ сопровождаются опасными перенапряжениями и являются основной причиной возникновения двойных и многоместных повреждений изоляции, оказывают существенное влияние на устойчивость функционирования устройств защиты от данного вида повреждений. Работа посвящена развитию и совершенствованию аналитических методов исследования переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ и моделирования их на ЭВМ.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕТЕЙ 6 – 10 кВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ	8
2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	12
3. ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВЫХ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 кВ	25
4. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 кВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $\alpha, \beta, 0$ -СОСТАВЛЯЮЩИХ	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	45

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Задачи, связанные с исследованиями переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ. Большая часть электрической энергии распределяется потребителям через электрические сети напряжением 6-10 кВ. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в сетях 6-10 кВ и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Наиболее опасными являются дуговые прерывистые ОЗЗ, представляющие собой последовательность повторных зажиганий и гашений заземляющей дуги [1-15 и др.]. Дуговой прерывистый характер ОЗЗ свойственен, прежде всего, начальной стадии развития повреждения изоляции. При небольших интервалах между повторными пробоями (в пределах достигающими половины периода промышленной частоты) дуговые прерывистые ОЗЗ сопровождаются значительными перенапряжениями на неповрежденных фазах и называются дуговыми перемежающимися. Кроме опасных перенапряжений дуговые перемежающиеся ОЗЗ сопровождаются увеличением среднеквадратичного (эффективного) значения тока в месте повреждения [16]. Интенсивные электромагнитные переходные процессы, сопровождающие дуговые прерывистые ОЗЗ, оказывают существенное влияние на устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений, основанных на использовании различных составляющих токов и напряжения нулевой последовательности установившегося режима замыкания [17-21]. Достаточно широкое применение получили также защиты от ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю [22-28 и др.].

Таким образом, необходимость в анализе переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях 6-10 кВ и оценке их параметров возникает при решении следующих задач:

1. Исследование перенапряжений в сетях 6-10 кВ в переходных режимах, сопровождающих дуговые прерывистые ОЗЗ.

2. Оценка эффективного (среднеквадратичного) значения тока в месте повреждения при дуговых прерывистых ОЗЗ.

3. Исследование влияния переходных процессов при ОЗЗ на устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений, основанных на использовании различных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ (промышленной частоты, высших гармоник, «наложенных» токов).

4. Оценка параметров и соотношений переходных токов и напряжений, используемых для действия защит от ОЗЗ, реагирующих на переходный процесс.

В.2. Методы исследований переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ. Учитывая сложность электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ, в России и других странах до 70-80-х гг. предпочтение отдавалось экспериментальным исследованиям в действующих сетях и на физических моделях [3, 5, 6, 9, 29-33 и др.]. Эти исследования послужили основой для разработки теоретических методов анализа и методов математического моделирования на ЭВМ переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, в т.ч. и в сетях 6-10 кВ.

В настоящее время, учитывая ограниченные возможности проведения экспериментов в действующих электроустановках, ограниченные возможности физического моделирования, а также в связи с созданием эффективных универсальных систем математического моделирования (например, MATLAB с пакетом расширения SIMULINK, ATP [34-38]) и специализированных программ моделирования электромагнитных переходных процессов в ЭЭС [24, 28, 29, 39 и др.] основным методом

исследования переходных процессов при ОЗЗ в сетях среднего напряжения стало имитационное моделирование на ЭВМ.

Имитационное моделирование на ЭВМ является наиболее мощным средством количественного анализа переходных процессов при ОЗЗ. Однако большое число факторов, влияющих на форму и значения информационных параметров электрических величин переходного процесса, и широкий диапазон изменения многих из них приводят к тому, что с применением метода имитационного моделирования можно проанализировать лишь ограниченную часть из практически бесконечного числа расчетных вариантов, соответствующих конкретным сочетаниям влияющих факторов. Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно существенно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные влияющие факторы и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей электрической сети и метода имитационного моделирования на ЭВМ.

В.3. Цель и задачи исследований. Целью работы является совершенствование методов исследования переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ.

В работе решаются следующие основные задачи:

1. Сравнительный анализ существующих подходов к аналитическому решению уравнений переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, в частности, в сетях 6-10 кВ и оценка области их применения.

2. Развитие методов аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ и их применение для решения указанных в п. В.1 задач.

В.4. Содержание работы. Работа включает введение, 4 раздела, заключение и библиографический список. В 1-м разделе дан сравнительный анализ существующих подходов к аналитическому решению уравнений переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, оценены условия и область их применения. В разделе 2 сформулированы требования к математическим моделям электрических сетей 6-10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ и приводятся примеры моделей, разработанных в системе моделирования Matlab. В разделе 3 исследованы возможности применения аналитического решения, полученного с использованием метода симметричных составляющих [24, 27, 40], для оценки максимальных перенапряжений по теории Белякова Н.Н. В разделе 3 приводится полученное решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ с использованием α , β , 0 – составляющих, приводятся результаты проверки достоверности и оценки точности полученного решения. В заключении приведены основные выводы по результатам исследований и разработок.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕТЕЙ 6 – 10 кВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

1.1. Требования к математической модели сети 6-10 кВ для исследования переходных процессов при замыканиях на землю

1.1.1. Выбор системы моделирования для исследования переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ. Для проверки адекватности и точности упрощенных аналитических решений уравнений переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ и оценки условий и области их применения необходимы достаточно точные решения указанной задачи, для получения которых целесообразно использовать современные системы математического моделирования. Для решения задач, связанных с исследованием переходных процессов в ЭЭС и электроэнергетических объектах наиболее подходящей принято считать универсальную систему моделирования MATLAB [35] с входящим в нее пакетом расширения SIMULINK [36].

Опыт использования указанных систем показал, что наиболее приемлемой для получения указанной выше модели сети является универсальная интегрированная система математического моделирования Система MATLAB ориентирована на массовые персональные компьютеры класса IBM PC и имеет мощные средства диалога, графики и комплексную подсистему представления и отображения информации. Система хорошо апробирована и рассчитана на решение широкого круга технических задач, в том числе в области электроэнергетики и электроники. Система MATLAB вобрала в себя передовой опыт развития и компьютерной реализации численных методов решения уравнений, накопленных за последние три десятилетия.

1.1.2. **Обобщенная схема электрической сети 6-10 кВ.** Приведенный анализ особенностей схем электрических сетей 6-10 кВ различного назначения позволяет выделить в них объекты и зоны, различающиеся условиями применимости ТЗНП, определяемых, как было показано выше, в основном соотношениями суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ и собственных емкостных токов присоединений $I_{C\text{собс}}$ защищаемого объекта. На рис. 1.1 показана обобщенная структурная схема электрических сетей 6 – 10 кВ с выделением в них указанных зон.

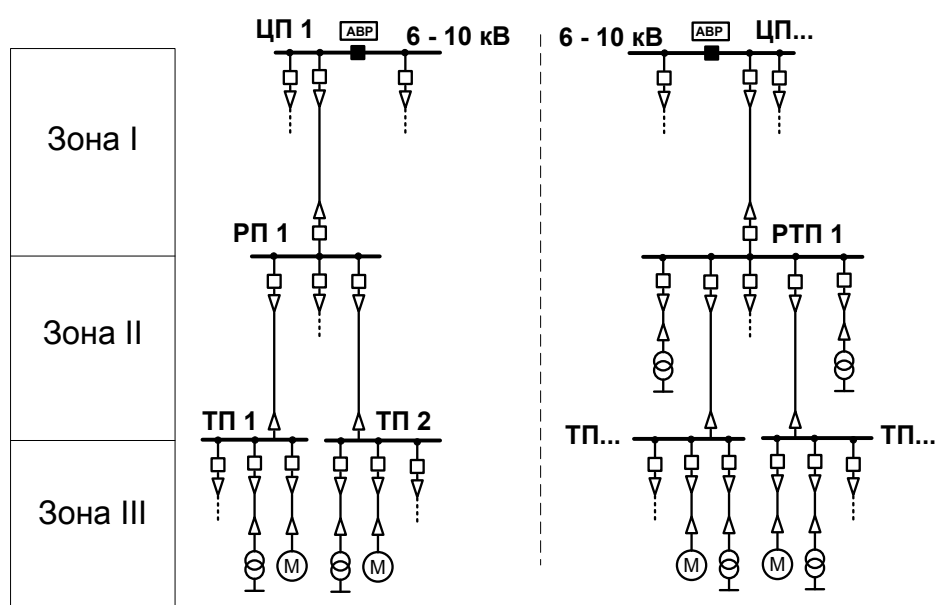


Рис. 1.1. Обобщенная схема электрической кабельной сети 6 – 10 кВ

На рис. 1.1 зона I – зона питающих линий, связывающих ЦП (ЦРП) с РП и РТП. Для питающих линий этой зоны характерны относительно большие значения собственных емкостных токов $I_{C\text{собс}}$ и, соответственно, наименьшие значения отношения $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma}$, т.е. наиболее тяжелые условия с точки зрения применимости ТЗНП. Зона II – зона питающих линий, связывающих РП и РТП с ТП, и распределительных линий на РТП. Для питающих линий этой зоны отношения $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma}$ будут больше, чем для зоны I, что облегчает условия применимости ТЗНП. Зона III содержит распределительные линии, связывающие электроприемники с шинами источника питания – ТП. Для распределительных линий зон II и III характерны небольшие длины и

соответственно небольшие значения отношения $I_{C\text{общ}}/I_{C\Sigma}$, определяющего условия применимости ТЗНП.

Модель сети создавалась с учетом рассмотренных ниже особенностей ОЗЗ. В отличие от разновидностей коротких замыканий (трехфазное, двухфазное и т.д.) разновидности ОЗЗ существенно отличаются по форме и значениям электрических величин, подводимых к измерительным органам защиты от этого вида повреждений и, следовательно, условиям функционирования последней. Все разновидности ОЗЗ можно разделить на 2 группы: устойчивые и неустойчивые. Устойчивые ОЗЗ, имеющие место при наличии надежной гальванической связи поврежденной фазы с землей (металлическая связь, переходное сопротивление, устойчиво горящая дуга), характеризуются наличием в токах и напряжениях только принужденных составляющих промышленной частоты и высших гармоник.

Неустойчивые дуговые замыкания – основной вид ОЗЗ – характеризуются прерывистой формой тока, в котором преобладают свободные составляющие переходного процесса с амплитудами, достигающими в зависимости от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$, удаленности точки ОЗЗ от шин, напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции, параметров линий электрической сети и др. значений до сотен и даже тысяч ампер. Все неустойчивые ОЗЗ условно можно разделить на 2 разновидности: однократные самоустраняющиеся пробои изоляции – «клевки земли» и дуговые прерывистые замыкания – последовательность, в общем случае непериодическая, самоустраняющихся пробоев изоляции.

С учетом этих особенностей сформулированы общие требования к выполнению модели радиальной электрической сети.

1. Модель должна быть универсальной, т.е. обеспечивать моделирование электромагнитных переходных и установившихся процессов, как в кабельных, так и в воздушных электрических сетях.

2. Модель сети должна быть трехфазной.

2. Модель должна легко наращиваться, видоизменяться, обеспечивать быструю адаптацию к изменениям схемы и режимов работы сети.

3. Модель должна содержать коммутационные аппараты (выключатели, ключи КЗ) и обеспечивать их подключение на любом участке сети.

4. Модель должна учитывать распределенный характер параметров линий электропередачи и наличие высших гармоник в сети.

5. Модель должна содержать развитые средства визуального контроля и наблюдения за моделируемыми процессами.

На рис 2.1 представлена трехфазная схема замещения радиальной электрической сети, удовлетворяющая рассмотренным требованиям. На основе указанной схемы замещения в системе MATLAB с помощью пакета расширения SIMULINK получена модель сети 6-10 кВ для исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ и коммутационных переключениях в сети.

На рис. 2.2 показано графическое представление модели сети в системе MATLAB, соответствующее схеме замещения сети рис. 2.1

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

2.1. О подходах к способам получения аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения. Известные аналитические решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения (в России – 3-35 кВ) можно классифицировать по следующим признакам:

1) по цели исследований переходных процессов при ОЗЗ (исследования перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ, исследования в целях оценки параметров и характеристик переходных токов при ОЗЗ, влияющих на функционирование защит от данного вида повреждений, исследования в целях определения соотношений электрических величин переходного процесса, используемых для выполнения защит от ОЗЗ);

2) по схеме замещения электрической сети, используемой для аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ;

3) по виду координат (составляющих), с использованием которых получено аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ (фазные составляющие, в симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности и др.).

2.2. Стадии переходного процесса при ОЗЗ и требования к расчетным схемам замещения сети. Сложность получения аналитического решения определяется, прежде всего, сложностью принятой расчетной схемы замещения сети для исследования переходных процессов при ОЗЗ. В свою очередь сложность расчетной схемы замещения электрической сети зависит от цели исследований переходных процессов при ОЗЗ и связанной с ней

необходимости учета различных стадий его развития. Любое ОЗЗ приводит к перераспределению напряжения отдельных фаз сети по отношению к земле. Потенциал заземлившейся зоны обмотки уменьшается или становится равным нулю, а потенциалы неповрежденных фаз приобретают другие значения. Этот единый сложный переходный процесс условно можно разделить на следующие стадии [42]:

1) скачкообразное снижение напряжения на поврежденной фазе в месте ОЗЗ, связанное с разрядкой емкостей поврежденной фазы на землю и перезарядкой междуфазных емкостей смежных элементов сети в месте повреждения, обуславливающее так называемое «первоначальное распределение» зарядов и напряжений. Эта стадия длится доли или единицы микросекунд;

2) распространение в обе стороны от места повреждения бегущих волн снижения напряжения, изменяющих потенциал поврежденной и здоровых фаз относительно земли. Волны снижения напряжения сопровождаются волнами емкостного тока, начинающего проходить через точку замыкания. На стыках неоднородных участков происходит преломление и отражение этих волн. При многократных пробегах волны снижения напряжения и тока деформируются и затухают. Данная стадия процесса длится десятки и сотни микросекунд;

3) обмен энергией между индуктивностью источника питания и емкостями линий, шин, аппаратов и других элементов сети, вызывающий появление колебаний средней частоты. Продолжительность данной стадии переходного процесса составляет тысячные и сотые доли секунды.

4) установление тока замыкания на землю промышленной частоты, которое продолжается несколько периодов.

К собственно волновым процессам относятся лишь первая и вторая стадии. Учитывая очень малую продолжительность 1-й стадии, практически не влияющую ни на величину перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ, ни на функционирование защит от данного вида повреждений, первую и

вторую стадию часто рассматривают как одну стадию и называют разрядной (связанной с разрядом емкостей поврежденной фазы). Третья стадия единого переходного процесса уже выходят за рамки определения «волновых явлений» - то есть всего сложного комплекса физических явлений и процессов, сопровождающих возникновение, распространение и быстрое изменение электромагнитного поля цепи или системы [42] и с достаточной степенью точности могут рассматриваться как электромагнитный переходный процесс в цепях с сосредоточенными параметрами. Эту стадию частот называют зарядной (связанной с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз сети). В дальнейшем будем условно считать, что в переходном процессе условно можно выделить две основные стадии – разрядную и зарядную.

Экспериментальные исследования в действующих сетях среднего напряжения и исследования на математических моделях показали, что максимальные перенапряжения в переходных режима ОЗЗ возникают на зарядной стадии [1-3, 9, 12-15 и др.]. Поэтому в расчетных схемах замещения сети для решения указанной задачи разрядную стадию, как правило, упрощенно, полагая, что она практически мгновенно обуславливает начальное распределение зарядов и напряжений. При обосновании расчетной схемы замещения сети для указанных расчетов учитывались также результаты многочисленных экспериментальных исследований переходных процессов при ОЗЗ, выполненных в указанные годы в разных странах (например, [2, 3, 30, 31 и др.]) в основном с использованием шлейфовых (светолучевых) осциллографов, применяемых для исследования физических процессов с ограниченной частотой [41]. На осциллограммах, полученных с использованием светолучевых осциллографов, из-за ограниченной полосы пропускания частот разрядная стадия либо вообще не наблюдается, либо практически не влияет на переходный процесс, что служило дополнительным обоснованием возможности неучета параметров элементов сети, влияющих на токи разрядной стадии.

При анализе влияния переходных процессов на функционирование защит от ОЗЗ, оценке значений электрических величин переходного процесса, влияющих на функционирование указанных защит, амплитудно-частотного спектра переходных токов, оценке среднеквадратичного (эффективного) значения тока в месте повреждения такое представление разрядной стадии не всегда приемлемо, т.к. может привести к значительным погрешностям в оценке значений электрических величин зарядной стадии и всего переходного процесса в целом. Поэтому для решения второй группы задач расчетная схема замещения сети должна учитывать не только зарядную, но и разрядную стадию переходного процесса.

2.3. Аналитические решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ для оценки перенапряжений дуговых перемежающихся замыканиях. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ можно получить только для упрощенной схемы замещения электрической сети среднего напряжения. Допустимая без существенной потери точности решения степень упрощения расчетной схемы замещения сети зависит от цели решения. Большая часть аналитических решений, полученных до 60-х гг., в основном было связано с оценкой максимальных перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью [например, 1-4, 12, 29].

При таких исследованиях принималось, что максимальные перенапряжения возникают при дуговых перемежающихся ОЗЗ на шинах центра питания (ЦП). С учетом этого в большинстве работ, посвященных исследованиям перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ в сетях среднего напряжения применялись упрощенные схемы замещения сети, в которых ОЗЗ рассматривалось только на шинах. На рис. 2.1 и 2.2 в качестве примеров приведены подобные расчетные схемы замещения сетей среднего напряжения, использованные в работах Лихачева Ф.А. [например, 3] и Белякова Н.Н. [например, 29].

Для схем замещения по рис. 2.1 и рис. 2.2 переходный процесс при ОЗЗ описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка, чему соответствует наличие в токах и напряжения 1-й свободной колебательной частотной составляющей. С учетом этого подобные схемы замещения иногда называют одночастотными.

Из рис. 2.1 и 2.2 можно видеть, что одночастотные схемы замещения не учитывают влияние разрядной стадии, что считается допустимым, как уже отмечалось выше, при исследованиях перенапряжений в переходных режимах ОЗЗ.

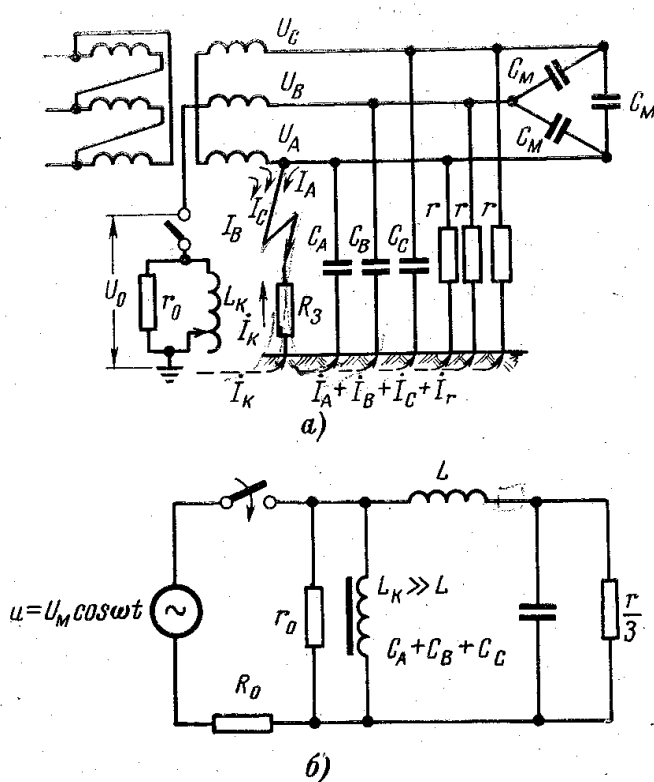


Рис. 2.1. Расчетные схемы замещения сети с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов по [3]: а – трехфазная; б – нулевой последовательности

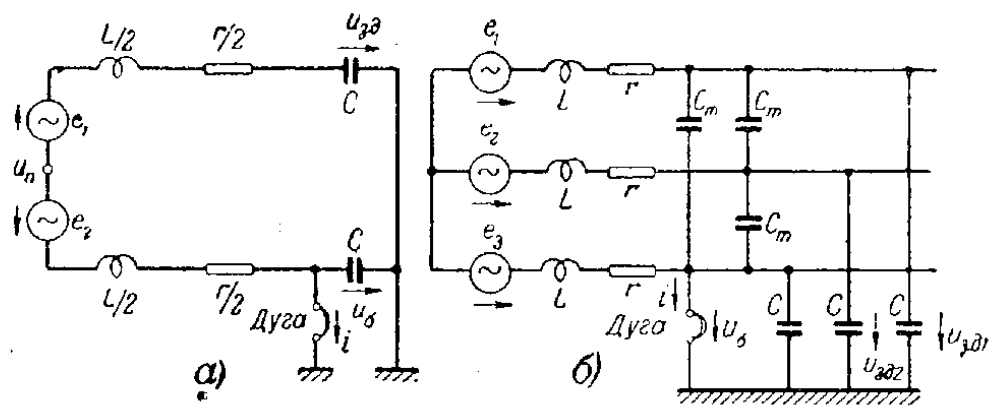


Рис. 2.2. Расчетные схемы замещения сети 6-10 кВ для исследования перенапряжений в переходных режимах ОЗЗ по [29]: а – однофазная (преобразованная); б – трехфазная

Следует отметить, однако, что исследования перенапряжений при дуговых ОЗЗ, выполненные на математических моделях сетей 6-35 кВ, показывают, что такое допущение приемлемо не всегда [например, 14, 15].

2.4. Аналитические решения уравнений переходных процессов при ОЗЗ для исследования их влияния на функционирование защит от ОЗЗ и разработки защит, основанных на использовании переходных процессов. К первым работам, посвященным оценке параметров токов переходного процесса в аспекте оценки их влияния на функционирование устройств защиты от ОЗЗ, можно отнести работу Koch W. [43]. В решениях уравнений переходного процесса при ОЗЗ, полученных в [43], в принципе учитываются обе стадии (разрядная и зарядная) переходного процесса при ОЗЗ, однако принимается, что разрядная стадия протекает независимо от зарядной и обуславливает начальное распределение напряжений, учитываемое при анализе зарядной стадии. Такое допущение приемлемо, если частоты разрядных и зарядных колебаний существенно различаются и каждый процесс можно анализировать, как процесс в одночастотном колебательном контуре 2-го порядка.

В работах [16, 24] показано однако, что частотное разделение разрядной и зарядной составляющих возможно не всегда, например, оно невозможно при удаленных от шин ОЗЗ, прежде всего, в воздушных сетях, когда индуктивность поврежденной линии до места повреждения соизмерима с индуктивностью источника питания.

В России (СССР) интерес к исследованиям электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в целях защиты от ОЗЗ появился в конце 50-х годов в связи с широким внедрением в электрических сетях среднего напряжения 3-35 кВ режима изолированной нейтрали и резонансного заземления нейтрали через ДГР и первыми разработками защит от данного вида повреждений, основанных на использовании электрических величин переходного процесса для повышения их селективности и чувствительности. Основной целью данных работ являлось исследование параметров и характеристик переходных токов и напряжений при ОЗЗ для оценки возможности их применения в защитах от данного вида повреждений, прежде всего, в компенсированных сетях. К первым исследованиям в данном направлении относится работа Сироты И.М. [44]. В [44] переходный процесс при ОЗЗ в компенсированной сети считается полностью идентичным переходному процессу при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью и рассматривается как переходный процесс в упрощенной схеме, представленной последовательным *LCR*-контуром (рис. 2.3), учитывающим лишь свободную зарядную составляющую и принужденную составляющую токов и напряжения нулевой последовательности. Позднее указанная упрощенная расчетная схема замещения электрической сети среднего напряжения использована в работах [45, 46] для оценки значений переходных токов при ОЗЗ и влияния на них параметров сети и переходного сопротивления в месте повреждения.

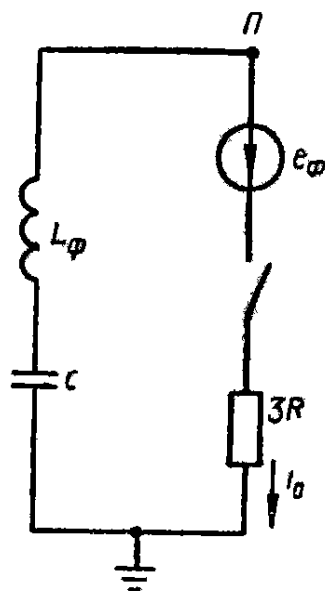


Рис. 2.3. Упрощенная (одночастотная) схема замещения для расчета переходных процессов при ОЗЗ в малом токе замыкания на землю

Одночастотная схема замещения сети среднего напряжения широко использовалась и в других работах для исследования переходных процессов при ОЗЗ [например, 47, 48 и др.]. В [16, 24] показано, что применение одночастотной схемы замещения сети (например, по рис. 2.3) не только не учитывает влияние разрядной составляющей на переходный процесс при ОЗЗ, но и приводит к существенным ошибкам в оценке зарядных составляющих переходного тока и напряжения нулевой последовательности.

Более точное математическое описание переходных процессов при ОЗЗ получено в работах Шуляка В.Г. [49, 50]. В расчетной схеме замещения сети с изолированной нейтралью, использованной в работах [49, 50], учитывается влияние на переходный процесс при ОЗЗ как зарядной, так и разрядной стадий, однако переходный процесс рассматривается для сети, состоящей из одной линии. Такое представление расчетной схемы замещения позволяет получить решение для тока нулевой последовательности в неповрежденной линии при ОЗЗ на шинах защищаемого объекта.

В [16] на основе анализа осциллограмм, полученных при ОЗЗ в реальных электрических сетях и на физических моделях, учитывающих

распределенный характер параметров линий [51], показано, что в разрядных и зарядных составляющих тока и напряжения переходного процесса преобладает по одной частотной составляющей, определяющей их форму и амплитуду. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает [51], что частота и амплитуда указанных частотных составляющих определяется практически только суммарной емкостью фаз сети на землю и суммарными междуфазными емкостями неповрежденной части сети, параметрами поврежденной линии на участке от шин до точки ОЗЗ и переходным сопротивлением R_{Π} в месте повреждения, которые должны быть учтены в расчетной схеме замещения. С учетом этих требований в [16] предложено для исследования переходных процессов в сетях 6-10 кВ использовать двухчастотную схему замещения, приведенную на рис. 2.4.

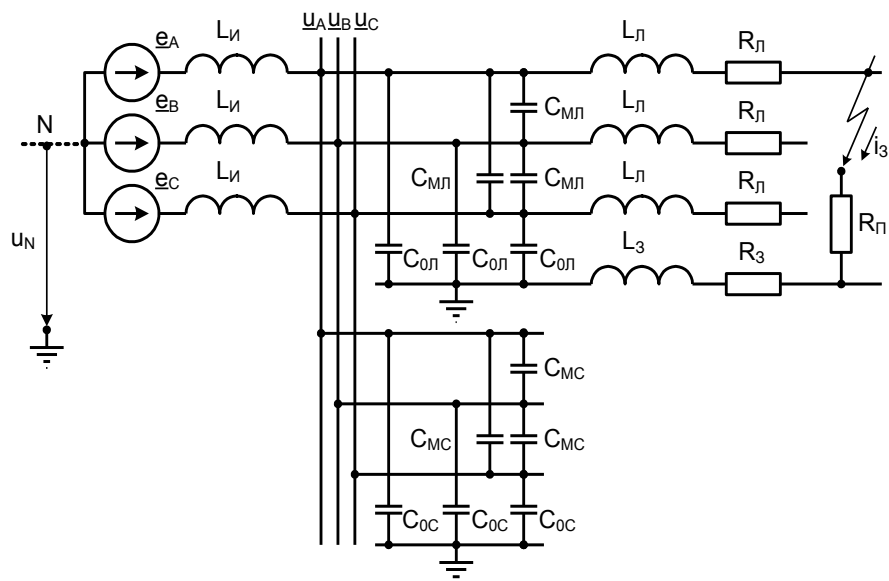


Рис. 2.4. Двухчастотная схема замещения сети 6-10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ

В отличие от ранее рассмотренных расчетных схем замещения и применение схемы по рис. 2.4 позволяет рассматривать обе стадии – разрядную и зарядную – как единый переходный процесс, что является преимуществом данного подхода.

Однако разрядная стадия переходного процесса при ОЗЗ, как уже отмечалось выше, в отличие от зарядной представляет собой явно выраженный волновой процесс. Поэтому расчет волнового переходного процесса по схеме рис. 1.4 как переходного процесса в электрической цепи с сосредоточенными параметрами приводит к погрешностям в оценке значений разрядных токов и напряжений. В [16, 24] не приводятся условия, при которых применение схемы замещения по рис. 2.4 обеспечивает приемлемую точность расчетных результатов.

2.5. Анализ условий применимости двухчастотной схемы замещения для расчетов переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ. Для оценки точности расчетов переходных процессов по схеме замещения рис. 2.4 и определения области ее применения сравним результаты аналитического решения с результатами моделирования на ЭВМ для схемы сети, учитывающей распределенный характер параметров линий.

В защитах сетей 6-10 кВ используются составляющие нулевой последовательности. Поэтому в [16, 24] для получения аналитического решения применен метод симметричных составляющих, позволяющий наиболее просто получить решения для составляющих нулевой последовательности. На рис. 2.5 приведена комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих. В схеме рис. 2.5 кроме режима изолированной нейтрали учтена также возможность заземления нейтрали сети через ДГР.

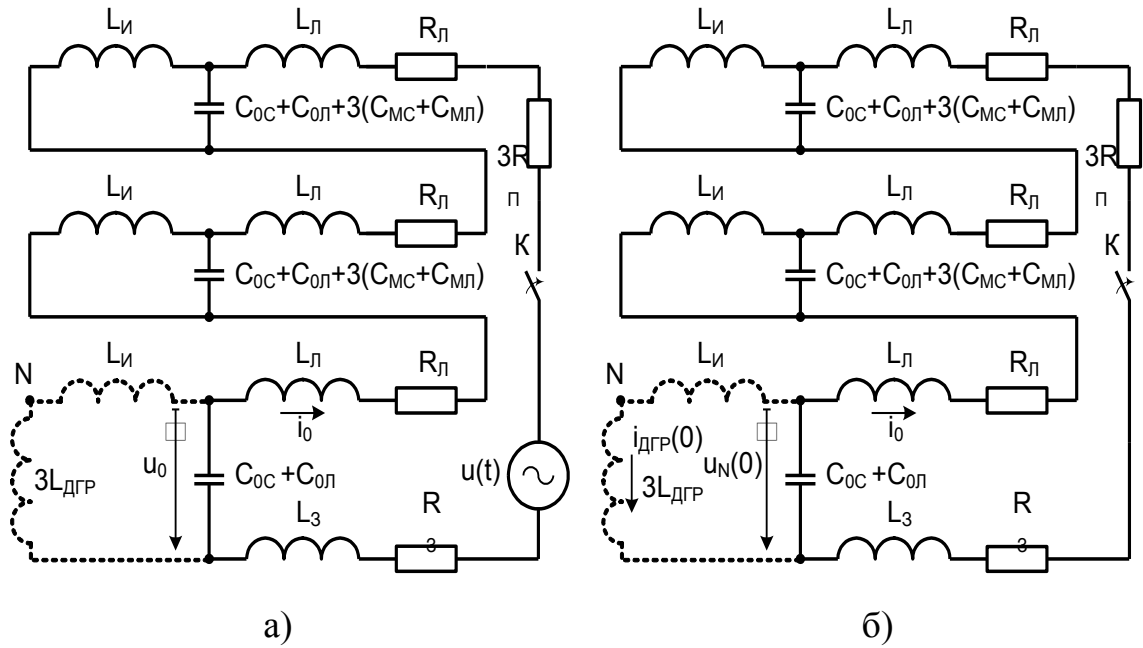


Рис. 2.5. Комплексные схемы замещения для расчета переходного процесса при ОЗЗ: а – при нулевых начальных условиях ($u_N(0) = 0$, $i_{ДГР}(0) = 0$); б) - для определения составляющих, обусловленных ненулевыми начальными условиями в момент пробоя изоляции ($u_N(0) \neq 0$, $i_{ДГР}(0) \neq 0$)

Для сети, работающей с изолированной нейтралью, при $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ в [16, 24] для напряжения нулевой последовательности получено следующее решение:

$$U_0(t) \cong U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 e^{-\delta_1 t} \left[1 - \frac{U_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_p t - U_m a_2 e^{-\delta_2 t} \left[1 - \frac{U_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_3 t \quad (2.1)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; \quad a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}.$$

Частоты и постоянные затухания разрядных и зарядных колебаний определяются по выражениям:

$$\omega_{p,3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 \pm \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (2.2)$$

$$\delta_{p,3} = \alpha \frac{\omega_{p,3}^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_{p,3}^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}. \quad (2.3)$$

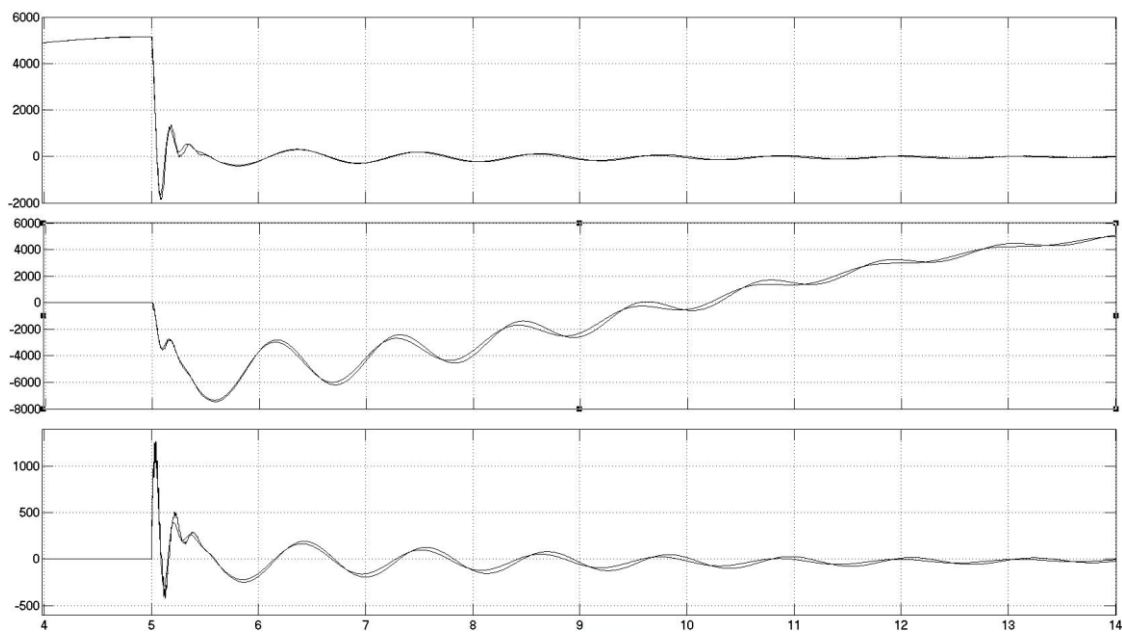
Ток нулевой последовательности в месте повреждения определяется из выражения:

$$i_3^{(1)} = 3i_0 = C_1 \frac{du_0}{dt} \quad (2.4)$$

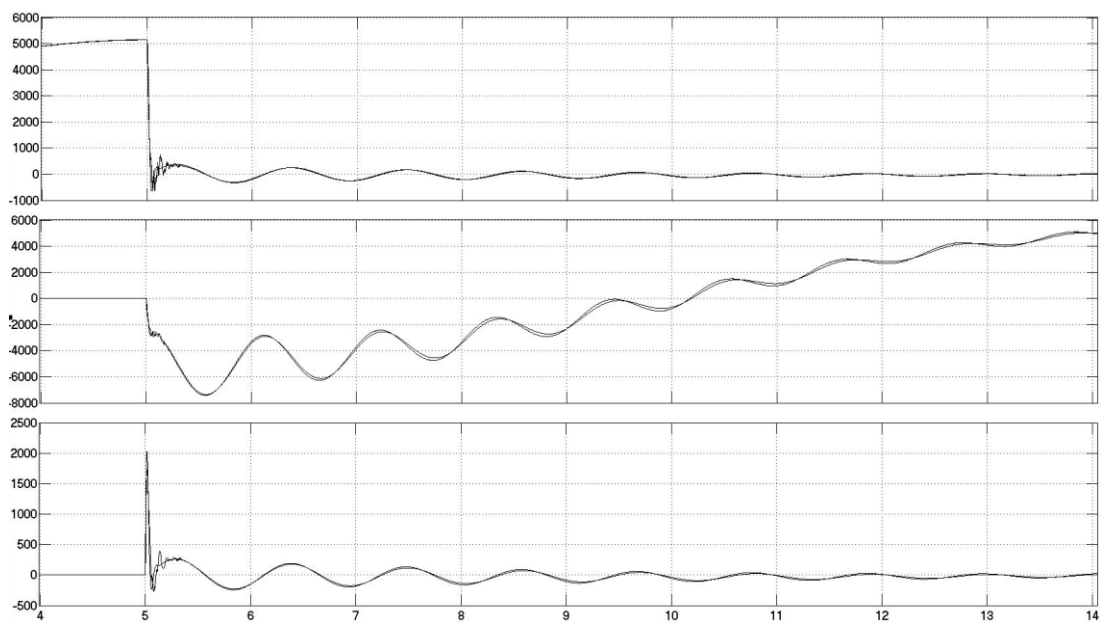
Для проверки адекватности и оценки точности полученного аналитического решения полученные на его основе функции $u_N(t)=u_0(t)$ и $i_3(t)=3i_0(t)$ сравнивались с аналогичными зависимостями, полученными на математической модели сети 6 кВ, выполненной в системе моделирования Matlab с учетом распределенного характера параметров поврежденной и неповрежденных линий. Моделируемая сеть 6 кВ содержала 10 линий различной длины ($l_{\text{л}} = 100 \dots 5000$ м), суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma} = 25$ А, моделировались ОЗЗ на расстоянии от шин $l_3 = 100 \dots 5000$ м.

Сравнение аналитического решения по уравнениям (2.1) – (2.4) с результатами расчета составляющих $i_0(t)$ и $u_0(t)$, выполненного в системе моделирования Matlab на математической модели сети 6-10 кВ, учитывающей распределенных характер параметров линии, показало, что погрешности аналитического решения, за исключением случая ОЗЗ вблизи шин, не превышает 10-20%, что приемлемо для приближенных оценок параметров переходных токов (например, рис. 2.6). Из рис. 2.6, а и 2.6, б также видно, что точность воспроизведения разрядной составляющей тока и напряжения нулевой последовательности возрастает по мере удаления точки замыкания на землю от шин источника питания.

Таким образом, предложенные в [16, 24] расчетная двухчастотная схема замещения сети 6-10 кВ и полученное на ее аналитическое уравнение переходного процесса при ОЗЗ позволяют не только рассматривать разрядную и зарядную стадию как единый переходный процесс, но и при определенных условиях получить достаточно точные оценки значений не только зарядных, но и разрядных составляющих токов и напряжений. С учетом этого ниже рассмотрена возможность применения данного решения для аналитической оценки максимальных перенапряжений в переходных режимах ОЗЗ.



а) $l_3 = 1$ км



б) $l_3 = 0,2$ км

Рис. 2.6. Сравнение результатов аналитического расчета $i_0(t)$ и $u_0(t)$ с результатами моделирования в системе Matlab: 1 – сигнал, полученный на модели сети в системе моделирования Matlab; 2 – сигнал, полученный на основе аналитического решения

3. ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВЫХ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 – 10 кВ

3.1. Основные теории дуговых перемежающихся ОЗЗ. Известно, что большая часть ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, имеет дуговой перемежающийся характер [1-4, 6, 9, 12, 13 и др.]. Существуют три основные теории возникновения максимальных перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью: Петерсена В., Петерса Дж. и Слепяна Х. и Белякова Н.Н. [1-4 и др.]. Согласно теории Петерсена В., предложенной в 1916 г., зажигания дуги происходят каждый полупериод промышленной частоты при максимальном значении восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе, а гашения дуги – при первом прохождении переходного тока замыкания через нулевые значения (рис. 3.1).

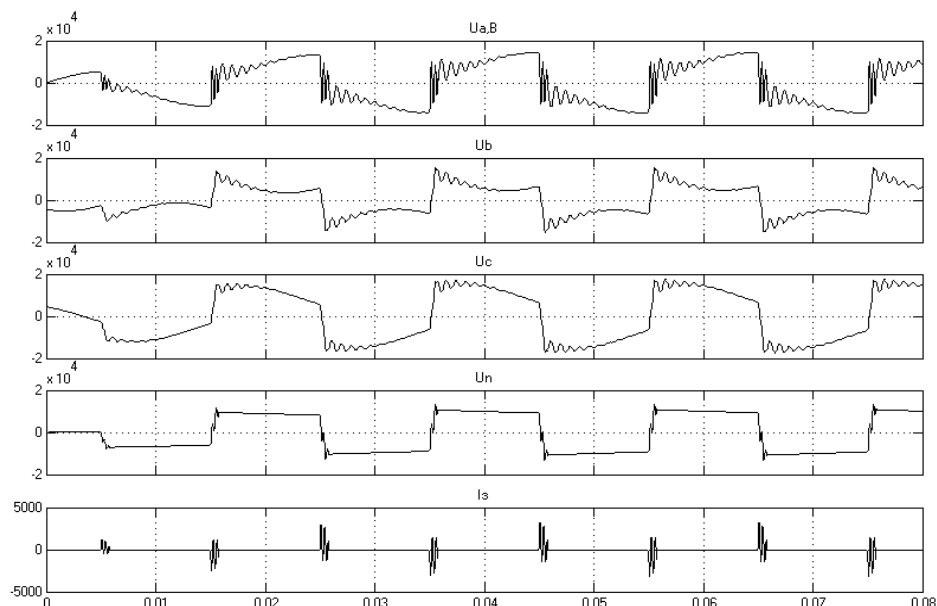


Рис. 3.1. Дуговое перемежающееся ОЗЗ по теории Петерсена в кабельной сети 6 кВс изолированной нейтралью: U_a , U_b , U_c – напряжения на шинах; U_n – напряжения на нейтрали сети; I_z – ток в месте ОЗЗ

По теории Петерса Дж. и Слепяна Х., разработанной в 1923 г., зажигания дуги происходят каждый период промышленной частоты при максимальных напряжениях на поврежденной фазе, а гашения – при прохождении через нулевые значения емкостного тока промышленной частоты (рис. 3.2).

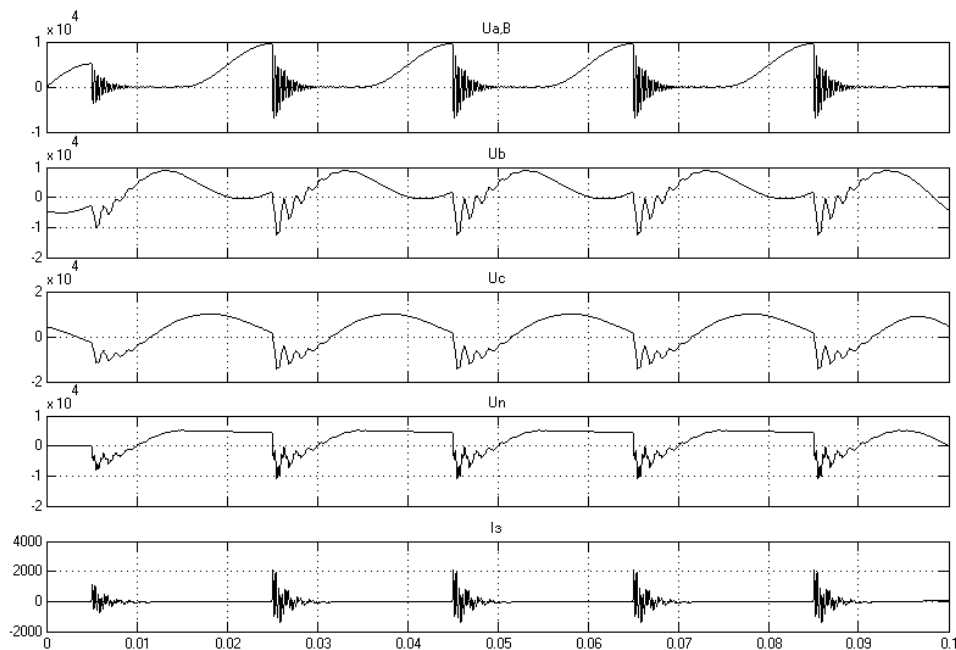


Рис. 3.2. Дуговое перемежающееся ОЗЗ по теории Петерса и Слепяна в кабельной сети 6 кВ: U_a , U_b , U_c , U_n , I_3 – то же, что и на рис. 3.1

В настоящее время наиболее точно отражающей физический характер процессов при дуговых перемежающихся ОЗЗ и дающей наиболее точные оценки максимальных перенапряжений считается теория Н.Н. Белякова [29].

Согласно этой теории, дуга может погаснуть как при первом, так как любом последующем переходе через нуль свободной составляющей тока замыкания. Попытка гашения заканчивается удачно, если первый высокочастотный максимум восстанавливающегося напряжения - пик гашения $U_{n.г}$ (рис. 3.3) не превышает определенного критического значения:

$$U_{n.г} \leq U_{кр}, \quad (3.1)$$

где величина $U_{кр}$ характеризует диэлектрическую прочность промежутка для момента времени, равного полупериоду колебаний гашения.

Установленная Беляковым Н.Н. при экспериментальных исследованиях максимальная величина $U_{н.г}$ равна ~ 1800 В, что составляет для сетей 6 кВ $0,37U_{ф.ном}$, для сетей 10 кВ - $0,22U_{ф.ном}$. При несоблюдении условия (3.1) гашение не завершается, т.е. дуга восстанавливается вновь.

Значение $U_{н.г}$ определяет в свою очередь величину напряжения смещения нейтрали сети $U_{см}$, а следовательно, и максимальную величину перенапряжений при повторных пробоях.

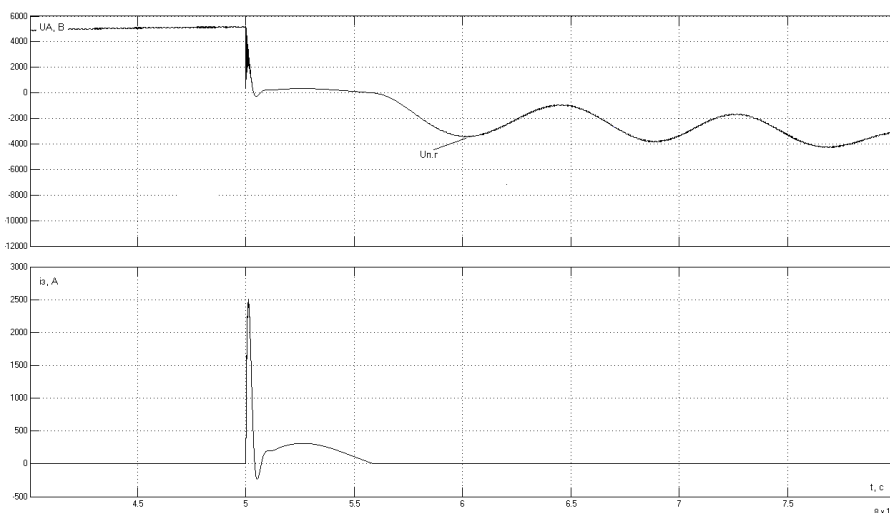


Рис. 3.3. Пик гашения при однократном пробое изоляции на фазе «А»
в сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{C\Sigma} = 20$ А

В соответствии с теорией Белякова Н.Н. для возникновения максимальных перенапряжений не требуется повторных зажигания дуги, поэтому достаточно рассмотреть один цикл «гашение – зажигание». В этом цикле гашение должно происходить в момент максимума ЭДС поврежденной фазы и при максимально допустимой для гашения крутизне тока, а последующее зажигание должно несколько опережать максимум восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе (угол зажигания $\psi \approx 68^\circ$ [29]).

На основе изложенных положений Беляковым была предложена следующая формула для оценки максимальных перенапряжений:

$$U_{пер} = \sqrt{3}U_m \sin(\varphi + 30^\circ) + (U_m \sin \varphi - U_{см}) \frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1-d); \quad (3.2)$$

$$U_{см} = U_m + \frac{U_{н.э}}{2} \leq 1,2U_m, \quad (3.3)$$

где U_m - амплитуда фазного напряжения сети; φ - угол (фаза) зажигания заземляющей дуги; $U_{см} = U_N(\varphi)$ - напряжение на нейтрали сети в момент зажигания дуги (напряжение смещения нейтрали); $C_{0\Sigma}$ и $C_{м\Sigma}$ - суммарные емкости сети соответственно между фазой и землей и между фазами; d - коэффициент, учитывающий затухание свободных колебаний вследствие потерь в контуре нулевой последовательности; $\frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1-d)$ - коэффициент, учитывающий уменьшение колебаний из-за междуфазных емкостей и затухания.

Максимальные перенапряжения возникают при угле зажигания φ , равном:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1-d) + \sqrt{3} \right]. \quad (3.4)$$

При характерных для кабельных сетей соотношений $C_{0\Sigma}/C_{м\Sigma} \approx 3$ и $(1-d) \approx 0,9$ максимальные перенапряжения возникают на отстающей фазе (например, фазе «В» при ОЗЗ на фазе «А») при угле зажигания $\varphi \approx 68^\circ$ и имеют максимальное значение

$$U_{пер.макс} \approx 3,2U_m. \quad (3.5)$$

В решении, предложенном Беляковым Н.Н., не учитывается действительный характер изменения напряжения на нейтрали сети $u_N(t)$ и

действительная частота свободных колебаний напряжений переходного процесса. Поэтому по теории Белякова Н.Н. по существу предполагается, что напряжение на нейтрали сети за четверть периода свободных колебаний напряжения не изменяется, оставаясь постоянным, и при пробое в момент максимума напряжения на «больной» фазе ($\varphi = 90^\circ$) перенапряжения на обеих неповрежденных фазах будут одинаковы. Практически, из-за конечной частоты колебаний (частота зарядных колебаний, связанных с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз в зависимости от параметров сети, источника питания, удаленности места ОЗЗ от шин может изменяться от сотен герц до нескольких килогерц), при $\varphi = 90^\circ$ перенапряжения на отстающей фазе «В» будут всегда меньше перенапряжений на опережающей фазе «С». Поэтому представляет интерес более точная аналитическая оценка перенапряжений при дуговых ОЗЗ с учетом реального характера переходных процессов при ОЗЗ.

3.2. Аналитическая оценка перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ. Для уточнения условий возникновения и оценки максимальных перенапряжений по теории Белякова Н.Н. воспользуемся рассмотренным выше решением уравнений переходного процесса при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью, полученным в [25, 40] для составляющих нулевой последовательности по двухчастотной схеме замещения сети 6-10 кВ по рис. 2.4:

$$\begin{aligned}
 u_0(t) = u_N(t) \approx & U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_p t - \\
 & - U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_3 t.
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Ток нулевой последовательности и его составляющие: принужденная, разрядная и зарядная находятся из уравнения:

$$\begin{aligned}
i_{0_3} &= -C_{0\Sigma} \frac{dU_0}{dt} = -(i_{0_{np}} + i_{0_p} + i_{0_3}) = -C_{0\Sigma} U_m \omega \text{Cos}(\omega t + \varphi) - \\
&- C_{0\Sigma} U_{m_p} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \text{Sin} \varphi} \right] * \text{Sin} \varphi \left[-\delta_p \text{Cos} \omega_p t + \omega_p \text{Sin} \omega_p t \right] - \\
&- C_{0\Sigma} U_{m_3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \text{Sin} \varphi} \right] * \text{Sin} \varphi \left[-\delta_3 \text{Cos} \omega_3 t + \text{Sin} \omega_3 t \right] \approx \\
&\approx -C_{0\Sigma} U_m \omega \text{Cos}(\omega t + \varphi) - C_{0\Sigma} \omega_p U_{m_p} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \text{Sin} \varphi} \right] * \text{Sin} \varphi \text{Sin} \omega_3 t - \\
&- C_{0\Sigma} \omega_3 U_{m_3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \text{Sin} \varphi} \right] * \text{Sin} \varphi \text{Sin} \omega_3 t = \\
&\approx -I_{mnp} \text{Cos}(\omega t + \varphi) - I_{m_p} e^{-\delta_p t} \text{Sin} \omega_p t - I_{m_3} e^{-\delta_3 t} \text{Sin} \omega_3 t,
\end{aligned} \tag{3.7}$$

где $I_{mnp} = \sqrt{2} I_{c\Sigma}$ - амплитуда принужденной составляющей переходного тока

i_0 ; $I_{m_p} \approx C_{0\Sigma} \omega_p U_{m_p} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \text{Sin} \varphi} \right] * \text{Sin} \varphi$ - амплитуда разрядной составляющей тока

i_0 ; $I_{m_3} \approx C_{0\Sigma} \omega_3 U_{m_3} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \text{Sin} \varphi} \right] * \text{Sin} \varphi$ - амплитуда зарядной составляющей тока i_0 .

В индуктивностях источника питания L_u протекают только принужденная и зарядная составляющие тока i_0 . Пренебрегая падением напряжения на индуктивностях L_{II} от составляющих промышленной частоты и учитывая, что токи зарядной составляющей в неповрежденных фазах «В» и «С» одинаковы и равны $3i_{0_3}/2$, а в поврежденной фазе «А» их сумме, из трехфазной схемы замещения сети (рис. 1.4) для фазных напряжений получим:

$$u_a \approx u_N + e_a - L_u \frac{d(3i_{0_3})}{dt}; \tag{3.8}$$

$$u_b \approx u_N + e_b - \frac{L_u}{2} \frac{d(3i_{0_3})}{dt}; \tag{3.9}$$

$$u_c = u_N + e_c - \frac{L_u}{2} \frac{d(3i_{0_3})}{dt}, \tag{3.10}$$

где

$$e_a = U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad (3.11)$$

$$e_a = U_m \sin(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}); \quad (3.12)$$

$$e_a = U_m \sin(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}). \quad (3.13)$$

Подставляя в выражения (3.8), (3.9) и (3.10) u_N из выражения (3.6) и i_{0_3} из (3.7), получим аналитическое решение для напряжения на поврежденной и неповрежденных фазах. При определении максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах значение $u_N(0)$ принимается равным максимальному напряжению смещения u_{cm} по выражению (3.5). Перенапряжения на неповрежденных фазах достигают максимального значения в момент, когда производная зарядной составляющей тока $i_{0_3}(t)$ достигает максимума, т.е. при $t = t_m = 2\pi/4\omega_3$. Из этого, в частности, следует, что максимальные значения максимум перенапряжений на неповрежденных фазах зависят от частоты зарядных колебаний при ОЗЗ.

Проверка адекватности и достоверности полученного аналитического решения была выполнена посредством сравнения расчетов по выражениям (3.8) – (3.10) и результатов моделирования на ЭВМ в программном комплексе MATLAB переходного процесса при ОЗЗ по схеме замещения рис. 1.4.

На рис. 3.6 – 3.9 приведены расчетные зависимости напряжения на нейтрали $u_N(t)$, тока в месте ОЗЗ $i_3(t)$, напряжений неповрежденных фаз $u_b(t), u_c(t)$, полученные на математической модели в системе Matlab и на основе предложенного аналитического решения.

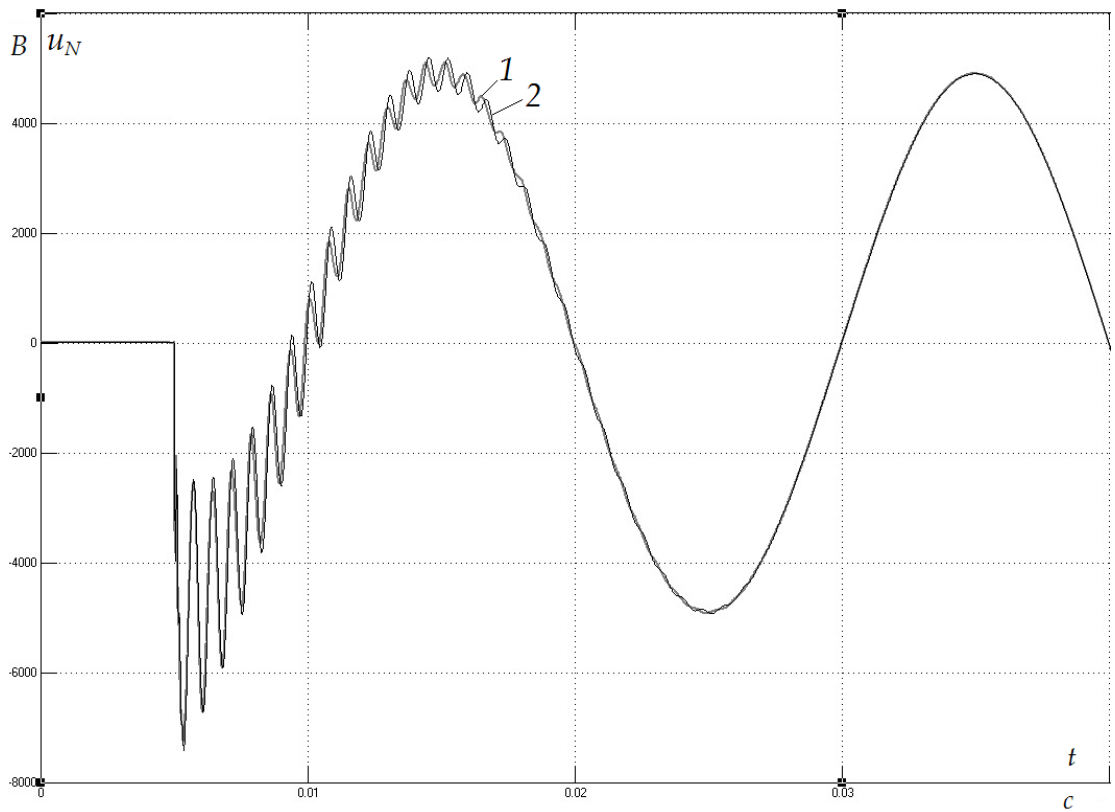


Рис. 3.6. Зависимости напряжения на нейтрали сети $u_N(t)$:

1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

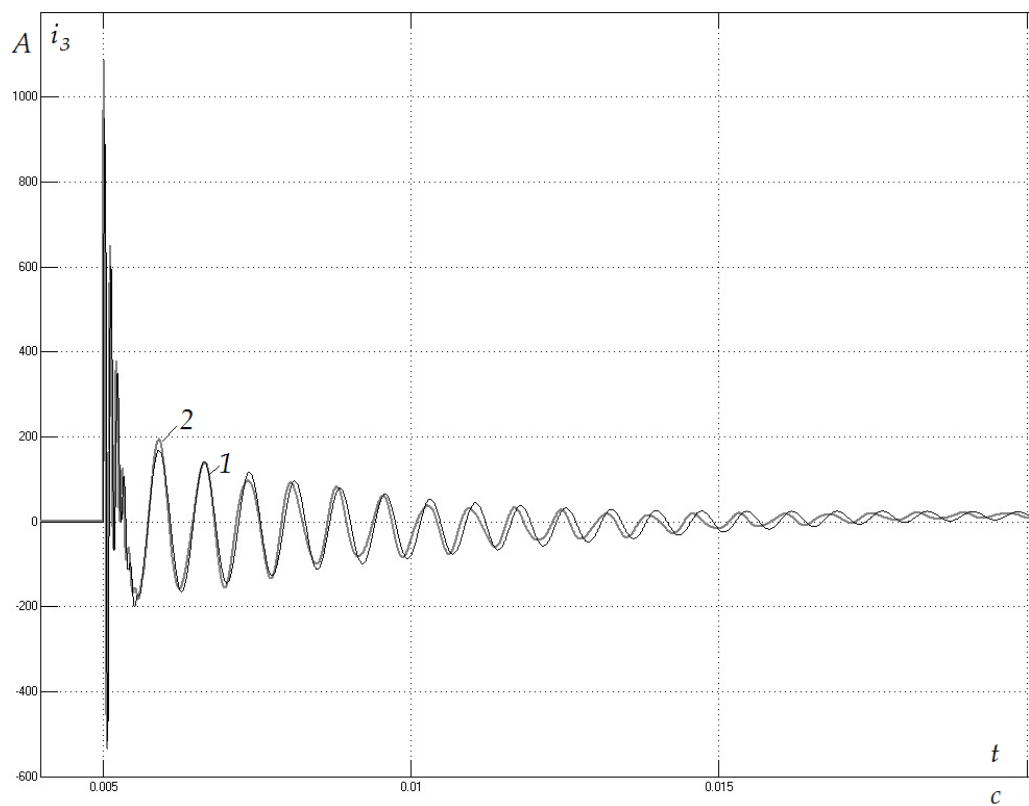


Рис. 3.7. Зависимости тока в месте ОЗЗ $i_3(t)$:

1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

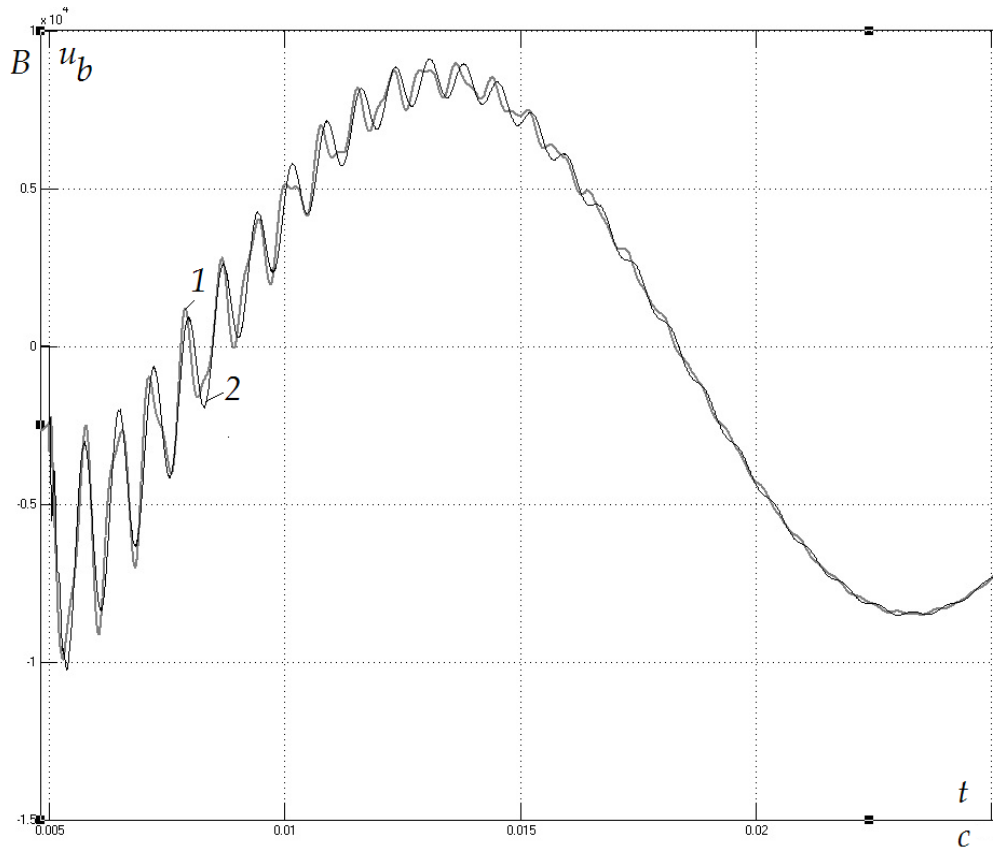


Рис. 3.8. Зависимости напряжения на неповрежденной отстающей фазе

$$u_b(t):$$

1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

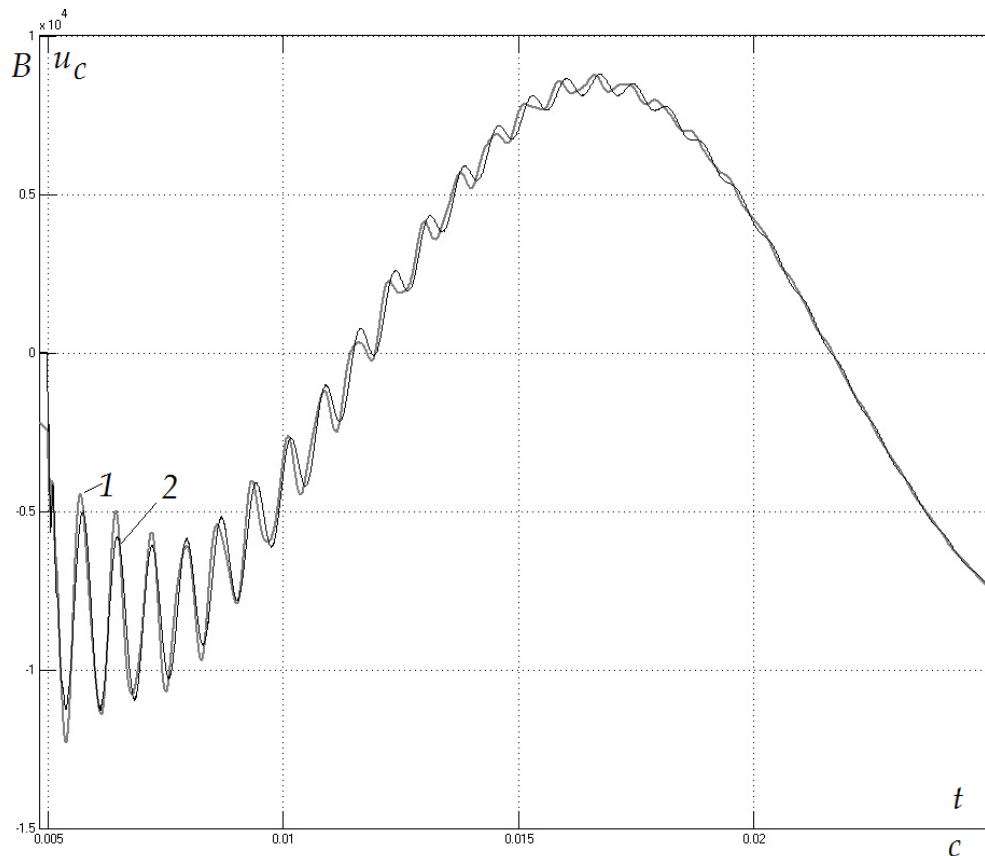
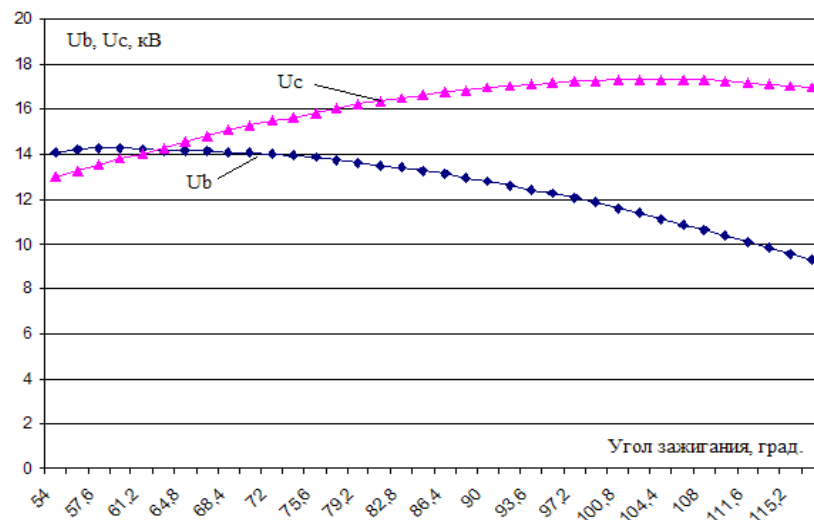


Рис. 3.9. Зависимости напряжения на неповрежденной опережающей фазе $u_c(t)$: 1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab;
2 – аналитическое решение

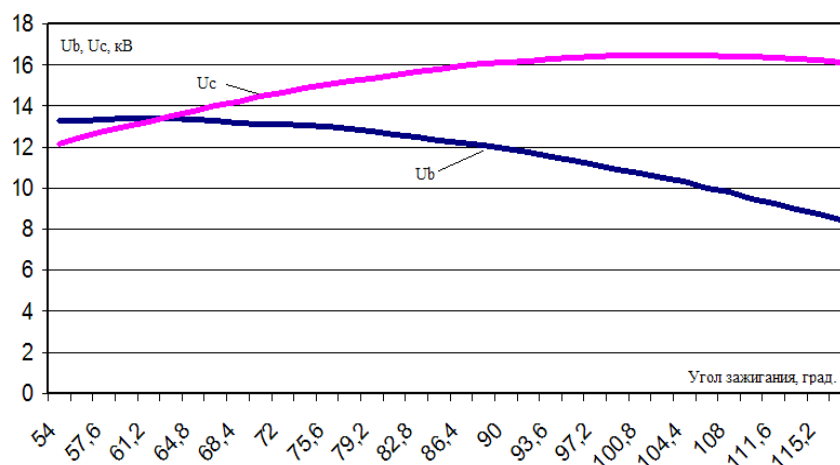
Сравнение результатов моделирования на ЭВМ в системе Matlab и аналитических расчетов по двухчастотной схеме замещения (рис. 1.4) показало, что погрешности последних не превышают 10-15%, что приемлемо для инженерных расчетов.

3.3. Применение аналитического решения по п. 3.2 для исследования условий возникновения максимальных перенапряжений. Полученное выше аналитическое решение было использовано для исследования условий возникновения максимальных перенапряжений по теории Белякова Н.Н. Анализ результатов вычислений показал, что с уменьшением угла зажигания φ_3 по отношению к моменту максимума напряжения на поврежденной фазе

«А» ($\varphi_3 = 90^0$) перенапряжения на отстающей неповрежденной фазе «В», как это и показано Беляковым Н.Н., увеличиваются и при значениях $\varphi_3 \approx 65^0 \dots 70^0$ достигают максимума. Величина перенапряжений на опережающей неповрежденной фазе «С» при этом уменьшается, однако максимальное значение перенапряжений на опережающей фазе «С» остается большим, чем на фазе «В». При увеличении значения угла зажигания ψ_3 по отношению к моменту максимума напряжения на поврежденной фазе «А» ($\varphi_3 = 90^0$) перенапряжения на отстающей фазе «В» уменьшаются, а на опережающей фазе «С» увеличиваются и достигают максимума при значениях $\varphi_3 \approx 105 \dots 110^0$. На рис. 3.10 приведены полученные на основе аналитического решения зависимости максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах «В» и «С» от угла зажигания φ_3 .



а)



б)

Рис. 3.10. Зависимости максимальных перенапряжений на здоровых фазах «В» и «С» от угла зажигания φ_3 в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 20$ А при различных значениях удаленности места ОЗЗ от шин $l_3 = 0,1$ км (а) и $l_3 = 1$ км (б)

Из рис. 2.10 можно видеть, что с уменьшением угла зажигания дуги φ_3 по отношению к моменту максимума напряжения на поврежденной фазе от ($\varphi_3 = 90^\circ$) перенапряжения на отстающей неповрежденной фазе «В» увеличиваются и достигают максимума, как это и обосновывается в теории Белякова Н.Н., при $\varphi_3 \approx 60-68^\circ$, однако остаются при этом меньше, чем перенапряжения на опережающей поврежденной фазе при $\varphi_3 \geq 90^\circ$. Максимальные перенапряжения при дуговых перемежающихся ОЗЗ возникают даже не при $\varphi_3 = 90^\circ$, а при углах зажигания $\varphi_3 \approx 105...110^\circ$.

Полученные результаты были проверены моделированием дуговых перемежающихся ОЗЗ на ЭВМ. В математической модели сети 6 кВ в системе Matlab был учтен распределенный характер параметров линий. При расчетах параметры модели сети с $U_{ном} = 6$ кВ варьировались в следующих пределах: суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma} = 5...25$ А, ток трехфазного КЗ на шинах (определяющий индуктивность источника питания) $I_K = 5...20$ кА,

удаленность места пробоя от шин $l_3 = 0 \dots 5$ км, угол зажигания дуги $\varphi_3 = 60 \dots 120^\circ$.

Анализ на математической модели сети 6 кВ подтвердил, что максимальные перенапряжения возникают не на отстающей, а на опережающей фазе при $\varphi_3 \approx 105 \dots 110^\circ$ (например, рис. 3.11).

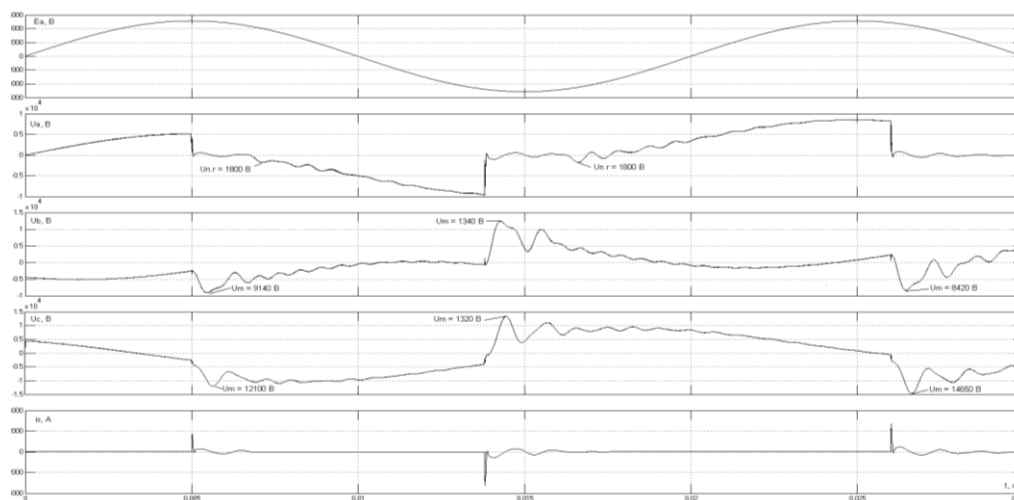


Рис. 3.11. Перенапряжения на неповрежденных фазах «В» и «С» при дуговом прерывистом ОЗЗ на фазе «А» в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 25$ А и удаленности места ОЗЗ от шин $l_3 = 0,25$ км при разных значениях угла зажигания φ_3 : 1-й пробой изоляции при $\varphi_3 = 90^\circ$; 2-й пробой – при $\varphi_3 \approx 68^\circ$ (теория Белякова Н.Н.); 3-й пробой при $\varphi_3 \approx 110^\circ$

Анализ на математической модели показал также, что параметры сети (суммарный емкостный ток $I_{C\Sigma}$, ток трехфазного КЗ на шинах I_K , удаленность места пробоя от шин l_3) на указанный характер зависимости максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах от угла зажигания φ_3 существенного влияния не оказывают, однако влияют на максимальные значения перенапряжений: перенапряжения увеличиваются при увеличении $I_{C\Sigma}$ и уменьшении индуктивности источника питания (т.е. тока I_K) и удаленности l_3 точки ОЗЗ от шин.

4. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 кВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $\alpha, \beta, 0$ -СОСТАВЛЯЮЩИХ

4.1. Постановка задачи. Как уже отмечалось выше, практическое применение для решения указанных во введении 4-х задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, с использованием аналитических методов получили 2 основных подхода:

1. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в фазных координатах a, b, c .

2. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в симметричных координатах прямой, обратной и нулевой последовательностей [1, 2 и др.].

Первый подход, как правило, применяется для решения первой из указанных во введении задач, когда требуется определить фазные напряжения и напряжение в нейтрали сети, второй подход – при решении 2-й и 3-й задач, когда требуется определить только составляющие нулевой последовательности. Для решения 4-й задачи в общем случае представляют интерес решение как для фазных, так и симметричных составляющих нулевой последовательности. Для получения решения в такой форме наиболее удобным представляется применение $\alpha, \beta, 0$ составляющих [например, 51].

4.2. Решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ в $\alpha, \beta, 0$ составляющих. Для аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ воспользуемся рассмотренной в разделе 2 двухчастотной схемой замещения сети 6-10 кВ (рис. 2.4), обеспечивающей, как было показано выше, приемлемую точность расчетов как зарядной, так и разрядной стадий.

С учетом граничных условий комплексную схему замещения при ОЗЗ на фазе A в $\alpha, \beta, 0$ -составляющих можно представить в виде, показанном на рис. 4.1.

Из схемы рис. 4.1 для составляющих нулевой последовательности напряжения на шинах и тока в месте повреждения в операторной форме получим:

$$U_0(p) = E_m \omega_1^2 \frac{(\omega \cos \varphi + p \sin \varphi)(p^2 + \omega_2^2)}{(p^2 + \omega^2) \Delta(p)}; \quad (4.1)$$

$$I_0(p) = p C_{0\Sigma} U_0(p) = p C_{0\Sigma} E_m \omega_1^2 \frac{(\omega \cos \varphi + p \sin \varphi)(p^2 + \omega_2^2)}{(p^2 + \omega^2) \Delta(p)}; \quad (4.2)$$

где

$$\Delta(p) = p^4 + \alpha p^3 + (K_c \omega_1^2 + \omega_2^2) p^2 + \alpha \omega_2^2 p + \omega_1^2 \omega_2^2. \quad (4.3)$$

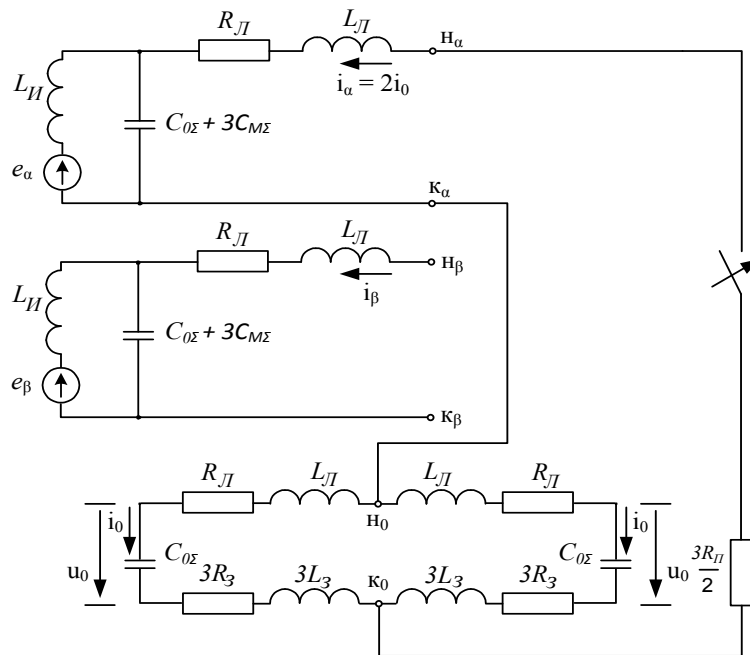


Рис. 4.1. Двухчастотная схема замещения сети 6 – 10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ в $\alpha, \beta, 0$ – составляющих

В уравнениях (3.1) – (3.3): $\alpha = \frac{3R_{Л} + 3R_3 + 3R_{II}}{L_{Л} + 3L_3}; \quad \omega_1^2 = \frac{1}{(L_{Л} + 3L_3)C_{0\Sigma}};$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{L_{II}(C_{0\Sigma} + 3C_{M\Sigma})}; \quad k_c = 1 + \frac{2C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + 3C_{M\Sigma}}.$$

Корни характеристического уравнения $\Delta(p) = 0$ определяют частоты и постоянные затухания свободных разрядной и зарядной составляющих напряжения и тока дополнительного режима. При малых потерях в контуре нулевой последовательности разрядная и зарядная свободные составляющие напряжения имеют характер затухающих колебаний, т.е.

$$p_{1,2} = -\delta_1 \pm j\omega_1 = -\delta_p \pm j\omega_p; \quad p_{3,4} = -\delta_2 \pm j\omega_2 = -\delta_3 \pm j\omega_3. \quad (4.4)$$

Частоты ω_p , ω_3 разрядных и зарядных колебаний приближенно определяются из решения биквадратного уравнения $\Delta(p) = 0$ при $\alpha = 0$ (случай «малых потерь»):

$$\omega_p \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (4.5)$$

$$\omega_3 \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}. \quad (4.6)$$

Для определения постоянных затухания δ_p , δ_3 при известных значениях ω_p , ω_3 будем рассматривать $\Delta(p) = 0$ как функцию δ_p и α и δ_3 и α . Раскладывая $\Delta(p)$ в ряд Тейлора по степеням δ_p и α и δ_3 и α в окрестности точек $p_p = -\delta_p \pm j\omega_p$ и $p_3 = -\delta_3 \pm j\omega_3$ и ограничиваясь первыми членами разложения, получим:

$$\delta_p \approx \alpha \frac{\omega_p^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_p^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}; \quad (4.7)$$

$$\delta_3 \approx \alpha \frac{\omega_3^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_3^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}. \quad (4.8)$$

Зная корни характеристического уравнения $\Delta(p) = 0$ с использованием теоремы разложения Хэвисайда из (4.5) при нулевых начальных условиях для напряжения последовательности получим:

$$u_0(t) = u_{0\text{дон}}(t) \approx E_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{mp} e^{-\delta_p t} \sin(\omega_p t + \varphi_p) - U_{m3} e^{-\delta_3 t} \sin(\omega_3 t + \varphi_3); \quad (4.9)$$

$$U_{mp} = E_m a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p}; \quad (4.10)$$

$$U_{m3} = E_m a_2 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3}, \quad (4.11)$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \varphi_p = \frac{\omega_p \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_p \sin \varphi}; \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\omega_3 \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_3 \sin \varphi}; a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}.$$

При начальной фазе пробоя изоляции $\varphi \rightarrow 90^\circ$ и $\omega_{p,3} \gg \omega$, $\varphi_{p,3} \rightarrow 90^\circ$

$$u_0(t) \approx E_m \cos(\omega t + \varphi) - E_m a_1 e^{-\delta_p t} * \cos \omega_p t - E_m a_2 e^{-\delta_3 t} * \cos \omega_3 t. \quad (4.12)$$

Аналогичным образом можно получить аналитическое решение для напряжения $u_0(t)$ при ненулевых начальных условиях, обусловленных смещением нейтрали сети в момент пробоя изоляции $u_N(0)$:

$$u_0(t) \cong E_m \sin(\omega t + \varphi) - E_m a_1 e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{E_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_p t - E_m a_2 e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{E_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_3 t. \quad (4.13)$$

Сравнение уравнений для напряжения нулевой последовательности $u_N(t) = u_0(t)$ (4.13), полученным для схемы замещения по рис. 2.4 с использованием α , β , θ составляющих, с уравнением для $u_N(t) = u_0(t)$ (2.1), полученным по методу симметричных составляющих для той же схемы замещения, показывает их идентичность, что является подтверждением адекватности и достоверности аналитического решения, полученного в α , β , θ составляющих

Ток нулевой последовательности может быть определен из схемы замещения по рис. 4.1 дифференцированием уравнений (4.12), (4.13):

$$i_0(t) = C_{0\Sigma} \frac{du_0}{dt}. \quad (4.14)$$

Рассмотренным способом могут быть определены α и β -составляющие токов и напряжений, а по α , β , 0-составляющим – фазные напряжения и токи при ОЗЗ.

Фазные составляющие и α -, β -, 0-составляющие токов и напряжений связаны между собой уравнениями, определяемыми равенствами [51]:

$$\begin{cases} i_a = i_\alpha + i_0; & u_a = u_\alpha + u_0; \\ i_b = i_0 - \frac{i_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta; & u_b = u_0 - \frac{u_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta; \\ i_c = i_0 - \frac{i_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta; & u_c = u_0 - \frac{u_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta. \end{cases} \quad (4.15)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулированы задачи, требующие исследований электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях 6-10 кВ.

2. Показано, что наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей электрической сети и метода имитационного моделирования на ЭВМ. Поэтому совершенствование и развитие аналитических методов исследования переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ и методов моделирования их на ЭВМ представляет актуальную задачу.

3. Дана классификация подходов и методов получения аналитического решения уравнений переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ и их сравнительный анализ. Показано, что достаточно точное аналитическое решение может быть получено на основе двухчастотной схемы замещения электрической сети 6-10 кВ, позволяющей рассматривать разрядную и зарядную стадии как единый переходный процесс.

4. С использованием аналитического решения, полученного для двухчастотной схемы замещения в работах В.А. Шуина с применением метода симметричных составляющих, получено аналитическое решение для оценки перенапряжений сетях 6-10 кВ в переходных режимах ОЗЗ.

5. На основе решения по п. 4 исследованы условия возникновения максимальных перенапряжений по теории Белякова Н.Н. Установлено, что максимальные перенапряжения возникают не на отстающей, а на опережающей неповрежденной фазе при значениях угла зажигания $\varphi_3 \approx 105 \dots 110^\circ$.

6. Результаты аналитических исследований по п. 5 проверены с использованием математического моделирования на ЭВМ в системе Matlab на модели сети 6 кВ, учитывающей распределенный характер параметров линий.

7. Для двухчастотной схемы замещения сети 6-10 кВ получено аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в α -, β -, 0-составляющих, позволяющее вычислить не только составляющие тока и напряжения нулевой последовательности, но и фазные величины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сиротинский Л.И.** Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах.– М.: Госэнергоиздат.– 1959.– 368 с.
2. **Вильгейм Р., Уотерс М.** Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
3. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. - М.: Энергия, 1971.
4. **Petersen W.** Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullpunkt widerstände und Funkenableiter // ETZ – 1918, U. 35 – С.341.
5. **Шуцкий В.И.** Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Шуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. **Шалыт Г.М.** Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат. - 1959. - С. 77 - 97.
7. **Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова Думка, 1985.
8. **Сирота И.М.** О режимах нейтрали сетей 6 – 35 кВ // Электрические станции. – 1988, № 6. – С. 69 – 73.
9. **Дударев Л.Е.,** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях / Л.Е. Дударев, С.И. Запорожченко, Н.М. Лукьянцев // Электрические станции. – 1971, № 8. – С. 64 – 66.
10. **Вайнштейн Р.А., Головкин С.И., Коломиец Н.В.** Режимы нейтрали в электрических системах. Уч. пособие.- Томск: Томск. Политехн. ин-т.– 1981.– 79с.
11. **Обабков В.К., Осипов Э.Р.** Сравнительный анализ способов заземления нейтрали в задаче подавления дуговых замыканий на землю // Известия вузов. Горный журнал. – 1988, № 3. – С. 94 – 97.

12. **Защита** сетей 6-35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.

13. **Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А.** Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6 - 10 кВ // Электричество. – 1998, № 12. – С. 8-22.

14. **Шуин В.А.** Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. Зависимость от режима заземления нейтрали. // Новости ЭлектроТехники - № 4(58) – 2009. – С.

15. **Шуин В.А., Солодов С.В.** Об эффективности ограничения перенапряжения при дуговых замыканиях на землю различных режимов заземления нейтрали электрических сетей 6-35 кВ // Вестник ИГЭУ – 2006 – № 2.

16. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3-10 кВ // Электричество, 1981. – С. 4-9.

17. **Добрягина О.А.** Исследование и разработка методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ /Дисс. канд. техн. наук. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. ун-т, 2011.

18. **Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С.** Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования // Новости ЭлектроТехники. Информационно-справочное издание. №2(62). - 2010. - С. 36-40.

19. **Шуин В.А., Сарбеева О.А.** Параметры токов переходного процесса при замыканиях на землю, влияющие на функционирование токовых защит нулевой последовательности электрических сетей 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ, 2006. Вып. 6. – С. 138-144.

20. **Шуин В.А., Сарбеева О.А. Чугрова Е.С.** Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. // Вестник ИГЭУ - 2009 - Вып. 4. - С. 84-91.

21. **Шуин В.А., Сарбеева О.А. Шагурина Е.С., Ганджаев Д.И.** Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ, 2011. Вып. 1 – С. 32-41.
22. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Защита электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
23. **Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В.** Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 248 с.
24. **Шуин В.А.** Теория и практическая реализация защит от замыканий на землю, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, для электрических сетей 6-35 кВ // Дис. ... докт. техн. наук. – Москва: ВНИИЭ. – 1994.
25. **Гусенков А.В.** Разработка комплекса средств селективной сигнализации однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ /Дисс. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т. – 1994.
26. **Мурзин А.Ю.** Разработка системы имитационного моделирования электроэнергетических объектов и ее применение для совершенствования защит от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ / Дис. ... канд. техн. наук. - Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т, 1996.
27. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.
28. **Шабад М.А.** Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ /Учебн. пособие. – СПб.: ПЭИПК, 2005.
29. **Беляков Н.Н.** Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ // Электрические станции, 1957, № 5. – С. 31-36.
30. **Г. Обердорфер.** Замыкания на землю и борьба с ними. – М.-Л.: Энергоиздат, 1932.

31. **Golding S.** Исследование переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях. Выбор защиты от замыканий на землю // Релейная защита. Пер. доклад. CIGRE под ред. А.М. Федоссева. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 323-334.
32. **Головко С.И.** Физическое моделирование электрических процессов, вызываемых перемещающимися дуговыми замыканиями, и его применение для защит от замыканий на землю / Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Томск: Томский политехн. ин-т, 1979.
33. **Вайнштейн Р.А., Головко С.И.** Физическое моделирование электрических процессов, вызываемых перемежающимися дуговыми замыканиями // Известия вузов. Энергетика, 1978, № 10.
34. **Дьяконов В.** Matlab 6: Учебный курс / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001.
35. **Дьяконов В.** Simulink 4. Специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002.
36. <http://www.atpdesigner.de/>
37. <http://www.ece.mtu.edu/atp/ATPDraw/ATPDraw.html>
38. ATPDesigner@aol.com
39. **Фролова О.В.** Разработка комплекса программных средств моделирования электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах для релейной защиты / Дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т, 1998.
40. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3-10 кВ // Электричество. – 1983, № 12. – С. 4 – 9.
41. **Осциллографы** светолучевые. Общие технические условия. ГОСТ 9829-81. – М.: Издательство стандартов, 1994.
42. **Каганов З.Г.** Волновые напряжения в электрических машинах. М.: Энергия. – 1970.
43. **Koch W.** Кратковременные замыкания на землю и их действие на реле // Энергетическое обозрение. Электротехнический выпуск, 1936, № 7.

44. **Сирота И.М.** Переходные процессы при замыканиях на землю в компенсированной сети при замыкании фазы на землю / Вопросы устойчивости и автоматики энергетических систем. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – С. 55-76.
45. **Сирота И.М., Масляник В.В.** Свободные костные токи замыкания на землю в сетях малыми токами замыкания на землю // Электричество. – 1977. - № 3. – С. 38-43.
46. **Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова Думка, 1985.
47. **Цапенко Е.Ф.** Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
48. **Дударев Л.Е., Зубков В.В.** Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6-35 кВ и использование их для средств релейной защиты // Электр. станции. – 1978. - № 6. – С. 68-71.
49. **Шуляк В.Г.** Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю // Известия вузов. Энергетика. – 1969. - № 1. – С. 1-6.
50. **Шуляк В.Г.** Исследование релейных защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, Новочеркасск. политехн. ин-т, 1968.
51. **Левинштейн, М.Л.** Операционное исчисление в задачах электротехники. Изд. 2-е, доп. – Л., «Энергия», 1972.