

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Амурский государственный университет
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет Энергетический

Кафедра Энергетики

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы «Электроэнергетические системы и сети»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав. кафедрой

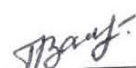
 Н.В. Савина

«09» 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Ограничение дуговых и феррорезонансных перенапряжений в сетях
6-35 кВ при однофазных замыканиях на землю

Исполнитель
студент группы 6420м

 08.06.2018
подпись, дата


Т.О. Валова

Руководитель
доцент, канд. техн. наук

 08.06.2018
подпись, дата

А.Н. Козлов

Руководитель научного
содержания программы
магистратуры
профессор, доктор. техн. наук

 09.06.2018
подпись, дата

Н.В. Савина

Нормоконтроль
доцент, канд. техн. наук

 08.06.2018
подпись, дата

А.Н. Козлов

Рецензент

 08.06.2018
подпись, дата

С.В. Лашков

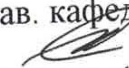
Благовещенск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет Энергетический
Кафедра Энергетики

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой


« 21 » 03

Н.В. Савина

2018 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Кашовой Тамиры Александровны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Ограничение дуговых и феррорезонансных перенапряжений в сетях 6-35 кВ при оптимальном зимовании на зимнюю
(утверждена приказом от 27.10.2017 № 2651-УЧ)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 01.06.2018

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: однолинейная электрическая схема участка сети 35 кВ территории ЕАО.

4. Содержание выпускной квалификационной работе (перечень подлежащих разработке вопросов): Анализ дуговых и феррорезонансных перенапряжений, способы ограничения перенапряжений, разработка способов ограничения перенапряжений сети 35 кВ.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) 5 таблиц, 8 рисунков

6. Дата выдачи задания 21.03.2018

Руководитель выпускной квалификационной работы: Козлов Александр Николаевич
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

доцент, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению (дата):

Ваня
(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 68 с., 15 рисунков, 26 формул, 6 таблиц, 48 источников.

ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, ОДНОФАЗНЫЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ИЗОЛИРОВАННАЯ НЕЙТРАЛЬ, КОМПЕНСАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ, РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ

В работе исследованы дуговые и феррорезонансные перенапряжения, возникающие в сетях при однофазных замыканиях на землю. Рассмотрены различные способы заземления нейтрали сети и их влияние на величину перенапряжений.

Цель работы – разработка способа ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю трехфазной сети 6-35 кВ. Работа произведена на примере участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО.

Рассмотрены и проанализированы основные способы защиты сетей 6-35 кВ от перенапряжений при однофазных замыканиях на землю.

На основании структурного анализа рассматриваемого участка сети и анализа различных способов ограничения перенапряжений предложен способ ограничения перенапряжений в рассматриваемой сети с помощью высокоомного резистивного заземления нейтрали.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	6
Введение	8
1 Анализ литературных источников	10
2 Режимы заземления нейтрали в сети 6-35 кВ	15
3 Дуговые перенапряжения	25
3.1 Дуговые перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью	26
3.2 Дуговые перенапряжения в сетях с компенсацией емкостных токов	30
3.3 Дуговые перенапряжения в сетях с нейтралью, заземленной через резистор	31
3.4 Сравнение влияния различных режимов заземления нейтрали на величину перенапряжений	34
4 Феррорезонансные перенапряжения	36
4.1 Общая характеристика феррорезонансных процессов	36
4.2 Феррорезонансные процессы при неполнофазных режимах	37
4.3 Феррорезонансные процессы в цепях трансформаторов напряжения контроля изоляции	41
5 Способы ограничения перенапряжений	43
5.1 Превентивные меры защиты от перенапряжений	43
5.2 Коммутационные средства защиты от перенапряжений	44
5.2.1 Ограничители перенапряжений нелинейные	44
5.2.2 Антирезонансные трансформаторы напряжения	46
6 Разработка способа ограничения перенапряжений при ОЗЗ сети 6-35 кВ на примере участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО	49
6.1 Структурный анализ участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО	49
6.1.1 Структурный анализ питающей подстанции	50
6.1.2 Структурный анализ электроэнергетической системы	51
6.1.3 Структурный анализ ЛЭП	52
6.1.4 Структурный анализ подстанций	53

6.2 Выбор и обоснование способа ограничения перенапряжений при ОЗЗ рассматриваемого участка сети	54
6.3 Реализация режима высокоомного резистивного заземления нейтрали участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО	55
6.4 Организация релейной защиты от ОЗЗ при высокоомном резистивном заземлении нейтрали сети 35 кВ	58
6.4.1 Устройство контроля изоляции	59
6.4.2 Токовая защита нулевой последовательности	60
Заключение	62
Библиографический список	64

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ДГР – дугогасящий реактор;

ЛЭП – линия электропередачи;

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю;

ОПН – ограничитель перенапряжения нелинейный;

ПС – подстанция;

ПТЭ – правила технической эксплуатации;

РЗ – релейная защита;

ТН – трансформатор напряжения;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭРЗ – элемент резистора защитного.

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Антирезонансный трансформатор напряжения – электромагнитный заземляемый трансформатор напряжения, устойчиво работающий при наличии в сети непрекращающихся феррорезонансных явлений и не вызывающий их.

Дуговое перенапряжение – перенапряжение, возникающее в сети при неустойчивом горении дуги в месте повреждения.

Перебегающая дуга – открытая электрическая дуга, периодически угасающая и вновь возникающая в электроустановках высокого напряжения и на проводах ЛЭП.

Перенапряжение – это напряжение, превышающее амплитуду наибольшего рабочего напряжения на изоляции элементов электрической сети.

Превентивные меры – предупреждающие, предохранительные действия.

Резонансная настройка дугогасящего реактора – такая настройка дугогасящего реактора, при которой емкостное сопротивление на землю равно индуктивному сопротивлению реактора.

Феррорезонанс – это резонанс в цепи, содержащей хотя бы один ферромагнитный элемент.

Феррорезонансное перенапряжение – резонанс напряжений, который сопровождается увеличением напряжения на емкости и на всех соединённых с этой емкостью элементах сети при последовательном соединении емкости и индуктивности с источником переменного напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Сети 6-35 кВ являются наиболее протяженными и массовыми среди сетей высокого напряжения и относятся к распределительным сетям. В значительной степени от уровня их надежности зависят показатели надежности систем электроснабжения в целом. Благодаря различному назначению и особенностям технологического процесса потребителей (промышленное производство, сельское хозяйство, собственные нужды электростанций), сети 6-35 кВ отличаются от сетей более высокого напряжения разнообразием схемных решений и используемого оборудования. Бесперебойность снабжения потребителей зависит от надежности работы сетей рассматриваемого напряжения. При повреждениях и отказах в распределительных сетях на производствах возможны повреждения оборудования и возникновение брака продукции, что приводит к большому экономическому ущербу.

Значительная доля отказов в сетях 6-35 кВ возникает из-за внутренних перенапряжений (феррорезонансных, дуговых и коммутационных). В сетях с токоограничивающими реакторами и в сетях с изолированной нейтралью внутренние перенапряжения являются причиной значительного числа аварий. Ежегодно по причине внутренних перенапряжений в сетях собственных нужд электростанций повреждается 5-8% установленных высоковольтных электродвигателей [12]. Значительная доля нарушений (до 80%) приходится на повреждения при феррорезонансных и дуговых перенапряжениях, возникающих при однофазных замыканиях на землю. При таких видах перенапряжений ежегодно повреждается порядка 6-8% установленных трансформаторов напряжения [29, 30] и 0,7% силовых трансформаторов [40].

Исходя из выше изложенного, аварийность сетей напряжением 6–35 кВ по причине внутренних перенапряжений достаточно высока, поэтому проблема дуговых и феррорезонансных перенапряжений в сетях 6-35 кВ является актуальной и требует исследования для поиска ее решения.

Целью данной магистерской диссертации является разработка способа ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю трехфазной сети 6-35 кВ. Работа произведена на примере участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО.

Задачи исследования следующие:

- Анализ теоретических и экспериментальных исследований в области дуговых и феррорезонансных перенапряжений в сетях 6-35 кВ;
- Описание существующих способов ограничения дуговых и феррорезонансных перенапряжений в сетях 6-35 кВ;
- Структурный анализ участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО;
- Выбор способа ограничения перенапряжений на рассматриваемом участке сети.

1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В технической литературе и периодической печати рассматриваемой проблеме уделено большое внимание, хотя не все аспекты проблемы перенапряжений освещены в полной мере. Сведения по вопросу перенапряжений при возникновении и отключении коротких замыканий содержатся в [1, 2]. Книга [1] посвящена проблеме внутренних перенапряжений и защите от них в системах с изолированной нейтралью, с компенсацией емкостных токов, с эффективным заземлением нейтрали. В работе [2] рассмотрено поведение сетей при различных видах заземления нейтрали и описана работа систем при заземлении нейтрали через катушку Петерсена, изучены процессы перенапряжений при отключении емкостных и малых индуктивных токов, повышения напряжения резонансного характера. Большое количество работ посвящено проблеме дуговых перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью. Основные теории дуговых перенапряжений изложены в работах зарубежных авторов [3, 4]. Развитие эти теории получили в исследованиях отечественных авторов [5, 6]. Анализ дуговых перенапряжений в этих работах проводился в упрощенных схемах без учета реальных конфигураций сети, но при этом дано вполне полное объяснение физики дуговых перенапряжений. Книга [7] содержит теоретические исследования перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях на землю, исследование горения дуг при различных видах повреждения изоляции в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. В работах [8, 9] приведены результаты экспериментальных исследований дуговых перенапряжений. Исследования проводились при искусственно создаваемых дуговых замыканиях и автоматической регистрации реальных дуговых перенапряжений на шинах подстанций и сетей собственных нужд. Согласно результатам исследований, наибольшие зафиксированные кратности по отношению к амплитуде фазного напряжения составили 3,0-3,5 о.е. в работе [10]. Увеличение кратности дуговых перенапряжений в конце отходящих от шин воздушных линий по сравнению с перенапряжениями на шинах показано в работе [10], и в ней же

сделан вывод о влиянии параметров схемы на кратность дуговых перенапряжений. Работы [11, 12, 13] также посвящены проблеме дуговых замыканий, в них подробно рассмотрены методы анализа перенапряжений и способы их ограничений. Авторы статьи [11] считают экономически целесообразным рекомендовать использование для снижения уровня возникающих перенапряжений при замыканиях на землю в постоянно включенные в нейтраль высокоомные активные резисторы, рассчитанные на возможность длительной работы в режиме однофазного напряжения. Информация об основах защиты от перенапряжений оборудования и систем электроснабжения в классе напряжения 6-35 кВ представлена в работе [12]. Здесь же рассмотрены причины возникновения и характер переходных процессов при перенапряжениях, приведены сведения об аппаратных средствах защиты. В исследовании [14] рассмотрены дуговые перенапряжения в сетях 6-10 кВ с токоограничивающими реакторами. Согласно исследованию [15], в сетях с токоограничивающими реакторами возможны дуговые перенапряжения с кратностью порядка 4,0-4,5 о.е. Данное исследование [15] проведено с помощью компьютерного моделирования. Дуговые перенапряжения при однофазных замыканиях на землю рассмотрены в работе [16]. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и сделан вывод о более высокой эффективности резистивного заземления нейтрали как средства ограничения дуговых перенапряжений по сравнению с дугогасящими реакторами. Также в работе [16] уделено внимание проблеме феррорезонансных перенапряжений и на основе данных эксперимента установлено, что предотвращение возникновения феррорезонанса возможно при включении активного сопротивления в нейтраль сети 35 кВ. В диссертации [17] разработана математическая модель феррорезонансных схем при отключении секций шин с воздушными выключателями, приведена оценка достоверности получаемых результатов моделирования и эффективности применения отдельных мероприятий по предотвращению феррорезонансных явлений. Феррорезонансные явления в цепях, включающих измерительные трансформаторы рассмотрены в работе [18]. В данной статье приведены сведения о современных антирезонанс-

ных трансформаторах напряжения. Разработана система уравнений измерительного трансформатора при однофазном замыкании. На основании системы уравнений была разработана имитационная модель феррорезонансного явления в цепях, включающих измерительный трансформатор. Эффективность использования резистивного заземления нейтрали показана и в работах [19, 20]. Согласно [20], резистивное заземление нейтрали сети 20 кВ позволяет организовать быстродействующую селективную работу устройств релейной защиты при ОЗЗ, ограничить уровень дуговых перенапряжений и исключить феррорезонансные процессы. Критерии выбора режима резистивного заземления нейтрали представлены в работе [21]. Основные аспекты, рассматриваемые при выборе режима заземления нейтрали сети, приведены в [22]. В [23] сделан вывод об опасности феррорезонансных перенапряжений для изоляции силовых трансформаторов. Способом предотвращения феррорезонансных процессов в трансформаторах является использование антирезонансных трансформаторов напряжения. Основные требования, предъявляемые антирезонансным трансформаторам перенапряжения сформулированы в работе [24]. Анализ причин повреждения оборудования в сетях с изолированной нейтралью приведен в исследовании [25]. Работы [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33] посвящены повреждениям трансформаторов напряжения при дуговых и феррорезонансных перенапряжениях. В [30] рассмотрены достоинства и недостатки сетей с резистивно-заземленной нейтралью. Предложен способ повышения надёжности работы указанных сетей, заключающийся в том, что при возникновении в сети однофазного замыкания на землю сеть переводится в режим однофазного глухого замыкания путём дополнительного подключения к земле повреждённой фазы с помощью разработанного устройства выбора повреждённой фазы и выключателя с пофазным управлением. Даны рекомендации по выбору параметров нелинейных ограничителей перенапряжений и устройств автоматики. Основные требования для защиты высоковольтного электрооборудования от перенапряжений сформулированы в [34, 35]. В них изложены основные меры защиты от рассматриваемых видов перенапряжений. Анализ исследований внутренних пе-

перенапряжений с малыми емкостными токами замыкания на землю выполнен в работе [35]. Здесь же приведен расчет переходного процесса в цепи собственных нужд энергоблока 200 МВт, с емкостным током замыкания на землю 2,3 А. Проведен анализ переходных процессов при коротком замыкании одной фазы на землю изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью электрической сети, предложены эффективные средства ограничения перенапряжений этих сетей. Рассмотрены исследования внутренних перенапряжений с большими токами замыкания на землю (компенсированные сети), а так же анализ работы системы при расстройке компенсации электрической сети, рассмотрены известные способы борьбы по ограничению возникающих, в этих случаях, перенапряжений. Современные средства ограничения перенапряжений при замыканиях на землю описаны в работе [36]. Так же в [36] выполнен анализ условий работы электрических сетей 6-35 кВ и применяемых в них средств ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю. Переходные процессы при замыканиях на землю достаточно сложны, их качественные и количественные характеристики зависят от большого числа факторов, степень влияния которых исследована недостаточно. Необходимы поиски средств ограничения перенапряжений или их использование в комплексе. Решение этих вопросов представляется возможным на пути разработки полных моделей элементов электрических сетей и средств ограничения токов и напряжений, отражающих все основные влияющие факторы, на основе новых методов и средств расчета электромагнитных переходных процессов. Работы [37, 38, 39] посвящены вопросам защиты сетей от однофазных замыканий на землю. В учебном пособии [38] изложены основные принципы построения защит от замыканий на землю и приведены примеры расчета устройств релейной защиты. В [39] произведен обзор режимов заземления нейтрали, рассмотрены принципы и типы защит от однофазных замыканий на землю, даны рекомендации по их применению в зависимости от режима заземления нейтрали и требований, предъявляемых к защите. Исследование [40] посвящено проблеме коммутационных перенапряжений на электродвигателях собственных нужд электростан-

ций. В [41] проанализированы причины возникновения перенапряжений и их влияние на надежность эксплуатации сети, предложены некоторые способы повышения надежности работы городских распределительных сетей. Анализ коммутационных перенапряжений, создаваемых выключателями различных типов, в том числе вакуумных дан в [45]. Так же здесь рассмотрены меры защиты от перенапряжений. Книга [47] посвящена основным вопросам теории и практики повышения уровня электробезопасности и надежности электроснабжения при замыканиях на землю в высоковольтных системах горных предприятий.

2 РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТИ 6-35 КВ

Выбор режима заземления нейтрали в сети 6-35 кВ является исключительно важным вопросом при проектировании и эксплуатации. Режим заземления нейтрали в сети 6-35 кВ определяет:

- ток в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании;
- схему построения релейной защиты от замыканий на землю;
- уровень изоляции электрооборудования;
- выбор ОПН для защиты от перенапряжений;
- бесперебойность электроснабжения;
- допустимое сопротивление контура заземления подстанции;
- безопасность персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях.

Очевидно, что режим заземления нейтрали в сети 6-35 кВ влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной сети.

В сетях среднего напряжения (с номинальным напряжением до 69 кВ по зарубежной классификации) применяются четыре режима заземления нейтрали (рисунок 1):

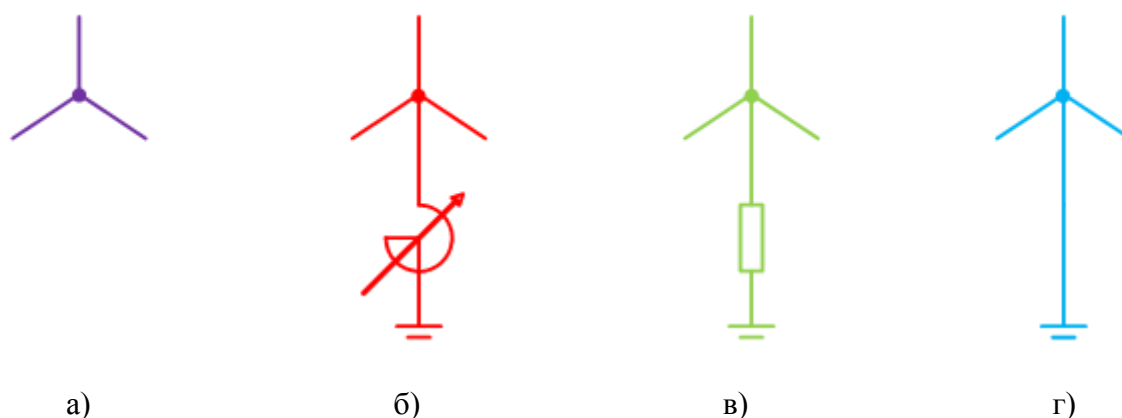


Рисунок 1 – Режимы заземления нейтрали

а) изолированная нейтраль; б) заземление через дугогасящий реактор; в) заземление через резистор; г) глухозаземленная нейтраль

Кроме указанных четырех режимов заземления нейтрали в мире применяется также комбинация (параллельное включение) дугогасящего реактора и резистора. Например, такая комбинация встречается в воздушных сетях 20 кВ Германии, где дугогасящий реактор обеспечивает гашение кратковременных однофазных перекрытий изоляции на землю, а низкоомный резистор подключается к нейтрали сети параллельно реактору только кратковременно специальным однофазным силовым выключателем. Резистор в такой схеме служит для селективного определения фидера с устойчивым однофазным замыканием на землю.

В таблице 1 представлены режимы заземления нейтрали в различных странах мира.

Таблица 1 – Режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения 3-69 кВ в различных странах мира

Страна	Способ заземления нейтрали			
	Изолированная	Заземленная через реактор	Заземленная через резистор	Глухозаземленная
1	2	3	4	5
Россия	+	+		
Австралия			+	+
Канада			+	+
США			+	+
Испания		+	+	+
Португалия			+	
Франция		+	+	
Япония			+	
Германия		+	+	
Австрия		+	+	
Бельгия			+	
Великобритания			+	+
Швейцария		+	+	
Финляндия	+	+	+	
Италия		+	+	
Чехия		+	+	

1	2	3	4	5
Словакия		+	+	
Швеция		+	+	
Норвегия		+	+	

Из таблицы видно, что в отличие от России, где используется режим изолированной нейтрали (примерно 80% сетей 6-35 кВ) и режим заземления через дугогасящий реактор (примерно 20% сетей 6-35 кВ), в других странах чаще всего применяется заземление нейтрали через резистор или дугогасящий реактор. Режим заземления нейтрали через резистор сравнительно новый и используется в России в ограниченном числе сетей 6-35 кВ. Впервые режим резистивного заземления нейтрали использовался в России в карьерных сетях 6 кВ в 1978-1983 г. [47] и сетях 6 кВ собственных нужд блочных электростанций примерно 1987 г. Однако, несмотря на полученный положительный опыт, развития использования резистивного заземления нейтрали в СССР не произошло. Вероятно, это было связано с отсутствием в основном нормативном документе – «Правилах устройства электроустановок» разрешения на использование режима резистивного заземления нейтрали.

В настоящее время в России в сетях 6-35 кВ нормативными документами (Правилами устройства электроустановок) разрешены к применению только три режима заземления нейтрали. Пункт 1.2.16 ПУЭ, введенных в действие с 1 января 2003 г. гласит: «...работа электрических сетей напряжением 3–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор».

Таким образом, в сетях 6-35 кВ в России разрешены все режимы заземления нейтрали кроме глухого заземления.

Четкое определение и рекомендации, в каких случаях в сетях 6-35 кВ должен использоваться тот или иной режим заземления нейтрали, в ПУЭ отсутствуют. В том же пункте 1.2.16 указаны только граничные емкостные токи, начиная с которых должна применяться компенсация емкостного тока:

«Компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при значениях этого тока в нормальных режимах:

- в сетях напряжением 3-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ - более 10 А;

- в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях электропередачи:

- более 30 А при напряжении 3-6 кВ;
- более 20 А при напряжении 10 кВ;
- более 15 А при напряжении 15-20 кВ;

- в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков генератор-трансформатор – более 5А» [48].

Режим изолированной нейтрали

Режим изолированной нейтрали достаточно широко применяется в России. Подавляющее большинство сетей 6-35 кВ (примерно 80%) работает именно с этим режимом заземления нейтрали.

На рисунке 2 приведена типовая двухтрансформаторная подстанция с изолированной нейтралью на стороне 6-10 кВ.

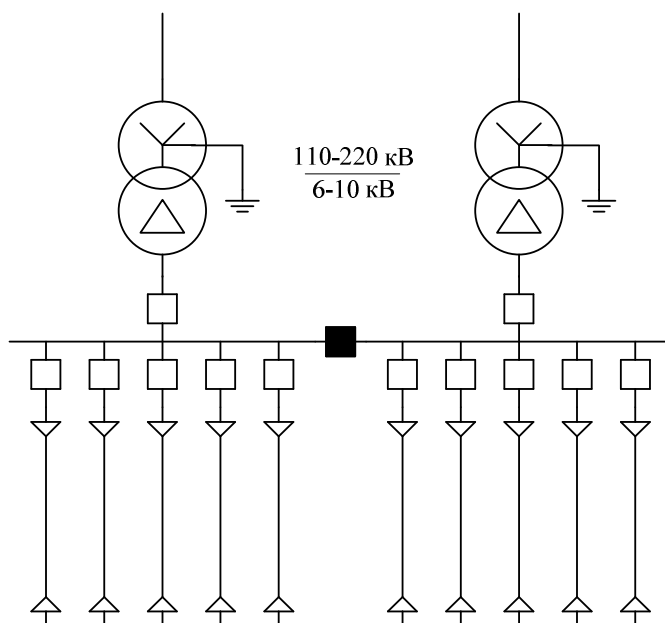


Рисунок 2 – Понижающая подстанция с изолированной нейтралью на стороне 6-10 кВ

При этом способе заземления нейтральная точка сети (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземления. В распределительных сетях 6-10 кВ России обмотки питающих трансформаторов, как правило, соединяются в треугольник, поэтому нейтральная точка физически отсутствует.

Режим изолированной нейтрали был первым режимом заземления нейтрали, использовавшимся в электроустановках среднего напряжения. Его достоинствами являются:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю;
- малый ток в месте повреждения (при малой емкости сети на землю).

Недостатки этого режима заземления нейтрали следующие:

- возможность возникновения дуговых перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым током (единицы–десятки ампер) в месте однофазного замыкания на землю;
- возможность возникновения множественных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей) из-за пробоев изоляции на других присоединениях, связанных с дуговыми перенапряжениями;
- возможность длительного воздействия на изоляцию дуговых перенапряжений, что ведет к накоплению в ней дефектов и снижению срока службы;
- необходимость выполнения изоляции электрооборудования относительно земли на линейное напряжение;
- сложность обнаружения места повреждения [39].

В связи с наличием большого количества недостатков режим изолированной нейтрали в сетях 6-35 кВ был исключен в подавляющем большинстве стран Европы, Северной и Южной Америки, Австралии и других странах еще в 40-50-х годах прошлого века.

В сетях среднего напряжения 3-69 кВ стран Европы, Северной и Южной Америки, Австралии режим изолированной нейтрали применяется крайне редко (в исключительных случаях). В основном сети среднего напряжения 3-69 кВ

этих стран работают с нейтралью заземленной через резистор или дугогасящий реактор.

Одной из стран, в которых имеется значительное число сетей с изолированной нейтралью является Финляндия. Там указанный режим используется исключительно в воздушных сетях 20 кВ и его применение существенно отличается от отечественной практики эксплуатации. В частности при наличии режима изолированной нейтрали в сети 20 кВ защиты от замыканий на землю действуют на мгновенное отключение поврежденной воздушной линии. При отказе в отключении выключателя отходящей линии с выдержкой времени 0,5 секунды отключается выключатель ввода на секцию. Режим изолированной нейтрали в воздушных сетях 20 кВ Финляндии применяется исключительно для повышения чувствительности защит от замыканий на землю, так как сопротивление грунта на большей части территории страны в 20-50 раз выше, чем средневропейское. При высоком удельном сопротивлении грунта заземление нейтрали (глухое или через резистор) не увеличивает ток в поврежденном фидере, так как он в основном определяется сопротивлением грунта. Применение изолированной нейтрали в данном случае является вынужденной мерой и причина такого технического решения является повышение чувствительности защит от замыканий на землю и безопасности людей.

Заземление через дугогасящий реактор

В этом режиме (рисунок 3) на секцию шин 6-10 кВ через специально выделенную ячейку подключается трансформатор вывода нейтрали (с соединением обмоток Y-0/D или Z-0) и дугогасящий реактор.

При однофазном замыкании на землю в сети дугогасящий реактор создает в месте повреждения индуктивную составляющую тока, равную емкостной. При этом суммарный ток в месте повреждения становится равным практически нулю и первое возникшее в сети однофазное замыкание на землю можно не отключать.

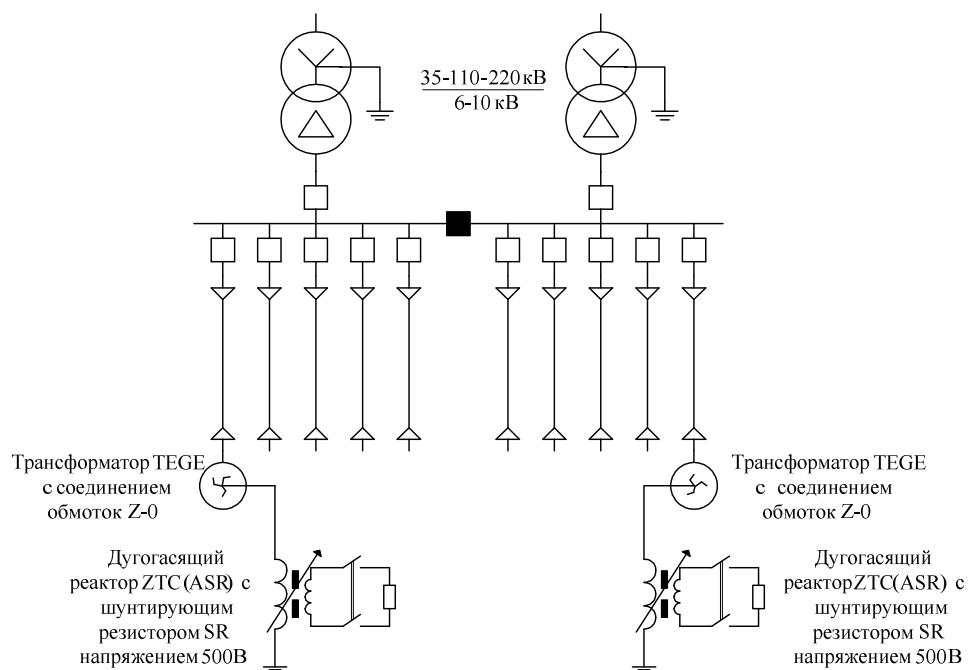


Рисунок 3 – Понижающая подстанция с нейтралью на стороне 6-10 кВ заземленной через дугогасящий реактор

Режим с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (катушку) также достаточно давно используется в России в сетях с большими емкостными токами (городских сетях, промышленных сетях).

Такое техническое решение имеет следующие преимущества:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания на землю и соответственно потребителя;
- малый остаточный ток в месте повреждения (не более 1-2А);
- самоликвидация однофазных замыканий (особенно на воздушных линиях);
- возможность организации селективной автоматически действующей релейной защиты от однофазных замыканий на землю
- исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов.

Недостатками этого режима работы нейтрали являются:

- Затраты на катушку могут оказаться высокими в связи с тем, что необходимо изменить значение реактивного сопротивления для то, чтобы адаптировать его к условиям процесса компенсации.

- В момент повреждения необходимо убедиться, что циркулирующий ток нулевой последовательности не опасен для оборудования и человека.
- Есть большой риск возникновения переходного перенапряжения в сети.
- Необходимо присутствие персонала, который осуществляет контроль работы оборудования.
- Необходимо применение сложной селективной защиты при первом повреждении.

Резистивное заземление нейтрали

Резистивное заземление нейтрали бывает высокоомным и низкоомным. При высокоомном резистивном заземлении нейтрали суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) не превышает 10А. Как правило, однофазное замыкание на землю при таком режиме заземления нейтрали можно не отключать и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал. Высокоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться только в сетях с емкостным током I_C не более 5-7 А. При низкоомном резистивном заземлении нейтрали суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) превышает 10А. Как правило, суммарный ток однофазного замыкания при этом режиме заземления нейтрали существенно превышает 10А, а именно достигает десятков и сотен ампер, что требует действия защит от замыканий на землю на отключение без выдержки времени (или малой выдержкой) [49].

На рисунке 4 приведены возможные варианты включения резистора в сеть.

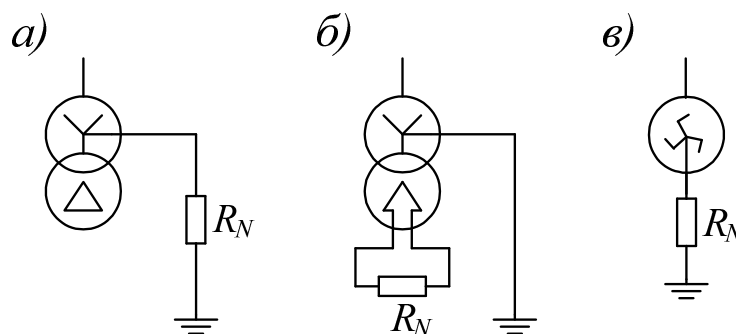


Рисунок 4 – Варианты включения резистора в сеть

В основном для реализации резистивного заземления нейтрали используют варианты а) и в). Вариант б) достаточно редкий и требует для своей реализации специального трансформатора.

Преимуществами сетей с нейтралью, заземленной через резистор, являются:

- Отсутствие необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания на землю (только для высокоомного заземления нейтрали);
- Отсутствие дуговых перенапряжений;
- Простая реализация релейной защиты;
- Исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов;
- Уменьшение вероятности поражения персонала и посторонних лиц (при низкоомном заземлении нейтрали и быстром отключении)

Недостатки резистивного заземления нейтрали следующие:

- Увеличение тока в месте повреждения (только для низкоомного заземления нейтрали);
- Необходимость отключения однофазных замыканий (только для низкоомного заземления нейтрали).
- Ограничение на развитие сети (только для высокоомного заземления).

Трансформатор вывода нейтральной точки

Трансформатор масляный заземляющий нулевой последовательности серии ТЕГЕ предназначен для вывода нейтральной точки в сетях с изолированной нейтралью и подключения к электрической сети 6-35 кВ дугогасящих реакторов или резисторов заземления нейтрали.

Предназначен для эксплуатации:

- в районах с умеренным климатом;
- при температуре окружающего воздуха в диапазоне от — 40 °С до +40°С;
- на открытом воздухе;
- при относительной влажности воздуха до 80%;

- на высоте не выше 1000 м над уровнем моря;
- в окружающей среде, не содержащей токопроводящей пыли и агрессивных газов и паров в концентрациях, вызывающих разрушение изоляции и металлических частей.

3 ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

В процессе эксплуатации электроустановок появляются напряжения, опасные для изоляции. Появление таких напряжений связано с перенапряжениями.

Под перенапряжением понимают любые повышения напряжения до величины, опасной для изоляции электроустановок, рассчитанной на рабочее напряжение.

Для обеспечения надежной работы электроустановок возможно применение изоляции, удовлетворяющей всем видам перенапряжений, однако это приводит к неоправданному удорожанию электроустановок. В связи с этим при проектировании и эксплуатации электроустановок необходимо предусмотреть ряд мер, позволяющих защитить их от перенапряжений. Для этого необходимо знать природу и возможные уровни перенапряжений.

В зависимости от причины возникновения перенапряжения можно разделить на внутренние и внешние.

К внутренним перенапряжениям относятся режимные, коммутационные и дуговые.

Режимные перенапряжения возникают в результате изменения режима работы электроустановки, например, при резких изменениях нагрузки, отключении токов короткого замыкания и др., что сопровождается выделением энергии, запасенной в электроустановке. Величина этой энергии определяет кратность перенапряжения, определяемую отношением амплитуд перенапряжения к рабочему напряжению.

Коммутационные перенапряжения возникают при нормальной эксплуатации линий в случае включения разомкнутой на конце линии, отключении работающих вхолостую трансформаторов, асинхронных электродвигателей, линий большой емкости.

Наиболее частым видом внутренних перенапряжений в сетях 6-35 кВ являются перенапряжения, связанные с однофазными замыканиями на землю. Их доля от всех видов аварий составляет до 80% [23].

Наибольшую опасность представляют дуговые перенапряжения. При горении дуги увеличивается фазное напряжение, появляются аperiodические составляющие токов, которые негативно сказываются на состоянии изоляции воздушных и кабельных линий. Кроме того, процесс горения дуги сопровождается выделением теплоты, из-за чего создаются благоприятные условия для перехода однофазного замыкания в междуфазное. Повышение фазных напряжений неповрежденных фаз является причиной пробоя ослабленной фазной изоляции других линий, подключенных к этим шинам.

По некоторым данным, около 60% всех замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ носят такой характер. Погасание и зажигание перемежающейся дуги вызывает сложные переходные процессы, интенсивность которых зависит от характеристики дуги, емкости, индуктивности, сопротивления цепи и др. [41].

В сетях с преобладанием кабельных линий отключения от перехода однофазного замыкания в междуфазное достигают 70% от общего количества отключений. Увеличение тока замыкания на землю приводит к росту вероятности перехода однофазных замыканий в межфазное непосредственно в точке горения дуги.

3.1 Дуговые перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью

Большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с повреждением изоляции относительно земли, то есть с однофазным замыканием на землю. Для обеспечения надежности работы сети необходимо, чтобы ток замыкания был настолько мал, чтобы в течение времени, необходимого для поиска и устранения повреждения, можно было бы обойтись без отключения потребителей. Согласно [37], такими допустимыми токами замыкания считаются токи 30, 20, 10 А (для сетей 6, 10, 35 кВ соответственно). В сетях генераторного напряжения и в сетях, содержащих высоковольтные

электродвигатели, допустимым током однофазного замыкания считается ток 5А. Как показывает опыт эксплуатации, при таких малых токах замыкания на землю дуга может гореть нестабильно. Повторные зажигания и погасания дуги являются своеобразным ключом, коммутация которого приводит к интенсивным переходным процессам, сопровождающимся перенапряжениями. Особую роль может играть накопление заряда одного знака в сети при зажигании дуги один раз за период промышленной частоты [42].

Переходный процесс дугового замыкания и гашения тока достаточно сложный и сопровождается возникновением значительных перенапряжений, которые могут быть опасными для изоляции оборудования сети. Установлено, что перенапряжения возникают при неустойчивом горении заземляющей дуги и сопровождаются смещением нейтрали системы, что может быть вызвано остаточными зарядами емкостей линии при гашениях дуги. В результате исследований было установлено, что обычно дуга пытается погаснуть при каждом прохождении полного тока через ноль. Но при этом сравнительно быстро с частотой собственных колебаний сети на дуговом промежутке восстанавливается напряжение, возникает повторный пробой и новое погасание, и так далее, пока восстанавливающееся напряжение собственной частоты не будет меньше предела $0.4U_{\phi}$. После этого дуга гаснет, на дуговом промежутке сравнительно медленно восстанавливается более высокое напряжение промышленной частоты, снова возникает пробой и процесс повторяется [29].

Максимальное значение перенапряжений определяется по следующей формуле:

$$U_{\text{м}} = 1,5 \cdot U_{\phi\text{м}} + 2,2 \cdot U_{\phi\text{м}} \cdot (1 - d) \cdot (1 - k) = 3,1 \cdot U_{\phi\text{м}} \quad (1)$$

Перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью с течением времени достигают некоторой предельной величины, которая зависит от активных проводимостей изоляции на землю и снижения пробивного напряжения в месте повреждения. Кратность дуговых перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью в большинстве случаев составляет 3,0-3,5.

Существует три гипотезы поведения дуги и разные расчетные кратности перенапряжений:

1.) Гипотеза Петерса и Слепяна. Эта гипотеза хорошо описывает свободно горящие дуги на открытом воздухе, например, возникающие при перекрытии гирлянды. Электрическая прочность изоляции после погасания дуги восстанавливается сравнительно медленно. Дуга пытается гаснуть при переходе через нуль тока промышленной частоты, когда высокочастотные составляющие существенно затухнут (рисунок 5).

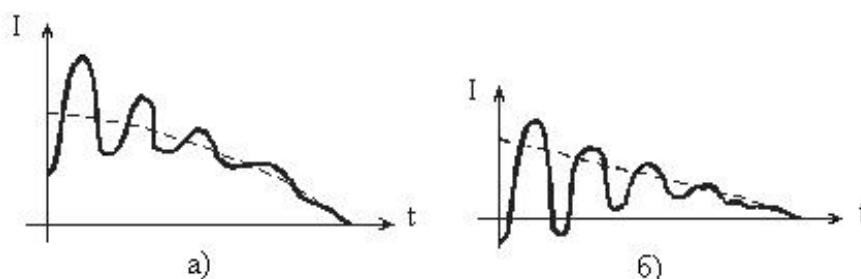


Рисунок 5 - Погасание дуги по гипотезам Петерса и Слепяна (а) и Петерсена(б)

2.) Если дуга горит под маслом или в узкой щели (например, в трещине кабельной муфты), то электрическая прочность изоляции восстанавливается весьма быстро, и дуга гаснет по гипотезе Петерсена. При достаточно малом токе дуга горит неустойчиво и после одного или нескольких повторных зажигания и погасаний дуга гаснет окончательно, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность и сеть восстанавливает свой нормальный режим работы.

3.) При промежуточном значении тока наблюдаются многократные повторные погасания и зажигания дуги, сопровождающиеся колебательными перезарядками емкостей сети и перенапряжениями. По гипотезе Белякова, дуга пытается погаснуть при каждом переходе через нуль полного тока с учетом высокочастотных колебаний. Однако пока восстанавливающееся напряжение превышает электрическую прочность изоляции, проходят «клевики» повторных зажигания до тех пор, пока не станет меньше и дуга погаснет. Именно этот режим замыкания фазы на землю с перемежающейся дугой в условиях эксплуатации сопровождается наибольшими как по величине, так и по длительности пе-

ренапряжениями, обусловленными смещением нейтрали системы, остаточными зарядами на емкостях линий при гашениях дуги.

На рисунке 6 приведены расчетные кратности перенапряжений по различным гипотезам в зависимости от параметров сети с учетом затухания. Наибольшие перенапряжения возникают по гипотезе Петерсена.

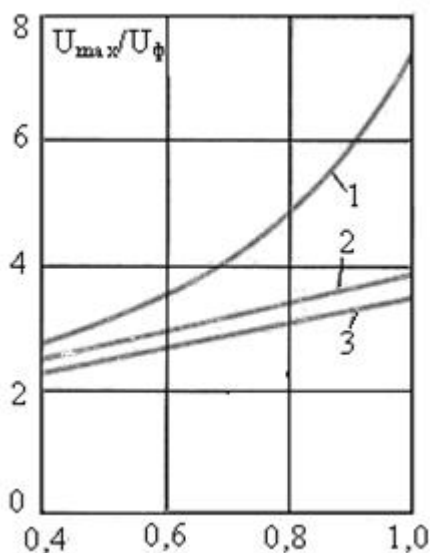


Рисунок 6 - Расчетные кратности перенапряжений по различным гипотезам в зависимости от параметров сети: 1 – по гипотезе Петерсена; 2 – по гипотезе Белякова; 3 – по гипотезе Петерса и Слепяна

По данным опыта эксплуатации эти перенапряжения в большинстве случаев лежат в пределах $K_{max} = 2-3$, но в отдельных случаях при горении дуги в стесненных условиях могут достигать $K_{max} = 3,5-4$.

Они возникают многократно и охватывают всю сеть, поэтому дуговые перенапряжения в сетях 6–35 кВ определяют уровень коммутационных перенапряжений и минимальный уровень изоляции в эксплуатации.

Дуговые перенапряжения в основном опасны не своей амплитудой, а длительностью существования и тем, что они, охватывая всю сеть, создают возможность пробоев ослабленных мест изоляции неповрежденных фаз в других точках сети. Пробой изоляции на неповрежденной фазе ведет к возникновению двойного замыкания через землю. Это означает, что фаза, поврежденная на одном из присоединений, имеет связь с поврежденной фазой на другом присоединении через сопротивление грунта. При такой ситуации зачастую по петле за-

мыкания протекают значительные токи, величина которых меньше уставки действия релейной защиты, но больше номинального тока оборудования. Эти токи, отключаемые с большой выдержкой времени, либо неотключаемые защитой, вызывают термическое разрушение ячеек распределительных устройств и выгорание кабелей, на которых существует замыкание, вызывая тем самым междуфазные короткие замыкания. Также из-за возгорания изоляции повреждаются кабели, проложенные рядом с первоначально поврежденными в кабельных каналах и туннелях. Поврежденные присоединения отключаются действием защит от междуфазных коротких замыканий, а распределительные устройства защитами выключателей ввода, обесточивая при этом всех потребителей, питающихся от данной подстанции. В этом случае существует опасность перенапряжений, возникающих при отключении одного из поврежденных присоединений.

Исходя из вышеизложенного, дуговые замыкания на землю являются серьезным фактором, снижающим надежность работы систем электроснабжения.

3.2 Дуговые перенапряжения в сетях с компенсацией емкостных токов

Согласно [7], при переходном процессе однофазного замыкания на землю дуга емкостного тока в сети с незаземленной нейтралью при сравнительно небольших токах может иметь перемежающийся характер и быть причиной значительных перенапряжений. При больших токах дуга может стать устойчивой и ее длительное горение может привести к междуфазному короткому замыканию [7]. Поэтому в сетях 6, 10, 35 кВ с токами замыкания на землю более 30, 20 и 10 А соответственно должны устанавливаться дугогасящие реакторы (ДГР) для компенсации емкостных токов.

При резонансной настройке, когда емкостное сопротивление на землю равно индуктивному сопротивлению реактора, создаются благоприятные условия протекания процессов при однофазных замыканиях такие, как минимальный ток промышленной частоты в месте повреждения, минимальная скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги, мини-

мальный уровень дуговых перенапряжений. Согласно ПТЭ (правилам технической эксплуатации), допускается работа с перекомпенсацией и временно – с недокомпенсацией, так как в реальных условиях емкость сети не постоянна и отсутствуют системы автоматической настройки компенсации, поэтому обеспечить режим благоприятной резонансной настройки оказывается невозможным. Ликвидация дугового замыкания в условиях недокомпенсации сопровождается наложением на установившееся напряжение промышленной частоты свободной составляющей близкой частоты, что называют процессом биения, при котором напряжение на поврежденных фазах достигает существенно больших значений. На здоровых фазах возможны высокие кратности дуговых перенапряжений – 2,6-2,77. При этом возможен режим многократных пробоев ослабленного места при высоких значениях пробивного напряжения. При резонансной настройке многократные пробои могут возникать только при $U < 1$.

Как показывает опыт эксплуатации, в первые годы работы электроустановок с компенсацией емкостного тока наблюдается снижение количества и кратностей перенапряжений, но затем начинает проявляться наличие слабых мест в изоляции. Это происходит потому, что процесс развития однократного пробоя твердой изоляции в полное замыкание может продолжаться длительное время, чему способствует сама компенсация емкостного тока однофазного замыкания [38].

3.3 Дуговые перенапряжения в сетях с нейтралью, заземленной через резистор

Вместо компенсации тока замыкания на землю может применяться заземление нейтрали через резистор (резистивное) с соответствующим изменением логики действия релейной защиты.

Резистивное заземление может быть высокоомным и низкоомным. Различие состоит в значении разрешенного тока замыкания на землю. Из теоретических исследований и опыта эксплуатации следует, что уменьшение величины дуговых перенапряжений и числа замыканий на землю, сохраняя тем самым возможность работы сети без автоматического отключения однофазных повре-

ждений, возможно за счет включения в нейтраль сети высокоомного резистора. Для высокоомного заземления нейтрали сети характерно срабатывание релейной защиты (РЗ) на сигнал. Низкоомное заземление нейтрали может применяться в сетях с любым емкостным током, но при этом ток замыкания на землю не должен превышать 500 А. Такое заземление, как указано в [39, 22] позволяет снизить вероятность возникновения в сети перенапряжений и двойных замыканий на землю и использовать простые токовые защиты от замыканий на землю, работающие на отключение.

Выбор типа резистора для заземления нейтрали производится по трем основным критериям:

- резистор должен обеспечивать снижение уровня дуговых перенапряжений;
- сопротивление резистора в нейтрали должно гарантировать протекание активного тока в поврежденном присоединении, достаточного для действия релейных защит на сигнал или на отключение поврежденного присоединения;
- при заземлении нейтрали через резистор должны соблюдаться условия электробезопасности для людей при однофазных замыканиях на землю на подстанциях и распределительных пунктах с учетом существующего нормирования величины допустимого напряжения прикосновения.

Основной параметр резистора – его активное сопротивление, величина которого выбирается по критерию снижения уровня перенапряжений и затем может корректироваться по условиям работы релейной защиты и условию электробезопасности.

При резистивном заземлении нейтрали ток замыкания на землю складывается из емкостного тока сети и активного тока, создаваемого резистором [21].

$$I_3 = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}, \quad (2)$$

где I_C – емкостный ток сети,

I_R – ток резистора.

Высокоомный резистор в нейтрали сети обеспечивает стекание заряда нулевой последовательности за время между ближайшими замыканиями, составляющее полупериод промышленной частоты ($T=0,01$ сек).

Постоянная времени T определяется формулой:

$$T = R_N \cdot 3 \cdot C, \quad (3)$$

где R_N – сопротивление высокоомного резистора,

C – емкость между фазой и землей.

Учитывая, что сеть трехфазная, и принимая $T=0,01$ сек, получим:

$$3 \cdot R_N \cdot 3 \cdot C = 0,01, \quad (4)$$

Откуда следует выражение для определения величины сопротивления резистора:

$$R_N = \frac{1}{900 \cdot C}. \quad (5)$$

Для обеспечения полного разряда емкостей фаз сопротивление резистора выбирают из условия:

$$I_R \geq I_C \quad (6)$$

Выбранный, исходя из этого условия, резистор создает в месте повреждения активную составляющую тока, примерно равную емкостной.

Емкостный ток замыкания равен:

$$I_C = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_\phi, \quad (7)$$

где ω – угловая частота, равная $2\pi f$, $f=50$ Гц.

Ток резистора:

$$I_R = \frac{U_\phi}{R_N}. \quad (8)$$

Принимая во внимание условие $I_C=I_R$, получим:

$$R_N = \frac{1}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{900 \cdot C}. \quad (9)$$

Полученное выражение совпадает с выражением (4).

В случае если пробивное напряжение ослабленного места станет меньше амплитуды фазного напряжения и установится процесс многократных зажигания и гашений дуги, кратность дуговых перенапряжений составит 2,2-2,5.

Важной особенностью применения высокоомного резистивного заземления нейтрали является то, что при снижении емкости сети постоянная времени стекания заряда нулевой последовательности через выбранный резистор уменьшится, и, следовательно, стекание заряда будет происходить быстрее [43].

Но и у резистивного заземления нейтрали есть недостатки – каждый однократный пробой будет приводить к неоправданному отключению присоединения с повреждением. Кроме того, в России в настоящее время включение резистора в нейтраль сети нормативно не регламентировано. Это препятствует распространению такого режима работы нейтрали и затрудняет исследования его как средства ограничения перенапряжений.

3.4 Сравнение влияния различных режимов заземления нейтрали на величину перенапряжений

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что режим изолированной нейтрали является самым неблагоприятным для работы сети, так как при сравнительно небольших значениях тока ОЗЗ возникают значительные перенапряжения. При увеличении тока ОЗЗ может перейти в междуфазное короткое замыкание (КЗ). В таком случае необходимо использовать ДГР для компенсации емкостных токов. Как отмечено выше, благоприятные условия протекания процессов при ОЗЗ возможны при резонансной настройке ДГР, но в реальных условиях емкость сети не постоянна и отсутствуют системы автоматической настройки компенсации, поэтому обеспечить режим благоприятной резонансной настройки сложно. Кроме того, длительное использование компенсации емкостных токов способствует увеличению продолжительности процесса развития однократного пробоя изоляции в полное замыкание, что, в свою очередь, приводит к ослаблению изоляции. Самым эффективным из рассмотренных выше режимов работы нейтрали сети является резистивное заземление нейтрали. Такое заземление позволяет снизить кратности перенапряже-

ний до более безопасных значений и снизить вероятность возникновения в сети двойных замыканий на землю. Главным преимуществом резистивного сопротивления нейтрали является отсутствие дуговых перенапряжений (при однофазном замыкании) и селективная релейная защита. Но резистивный режим работы нейтрали нормативно не регламентирован, что затрудняет его использование.

В таблице 2 приведены кратности перенапряжений при различных способах заземления нейтрали.

Таблица 2 – Кратности перенапряжений при различных способах заземления нейтрали

Режим работы нейтрали	Кратность перенапряжений
1	2
Изолированная нейтраль	$3 - 3,5U_{\Phi}$
Режим с компенсацией емкостных токов	$2,6 - 2,8U_{\Phi}$
Резистивное заземление нейтрали	$2,2 - 2,5U_{\Phi}$

Как видно из таблицы 1, наименьшие кратности перенапряжений наблюдаются при работе сети в режиме резистивного заземления нейтрали, в следствие чего, такой режим в плане ограничения перенапряжений на данный момент является наиболее эффективным из рассмотренных.

4 ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

4.1 Общая характеристика феррорезонансных перенапряжений

Феррорезонанс – это резонанс в цепи, содержащей хотя бы один ферромагнитный элемент [25].

Причиной возникновения феррорезонансных процессов в электрических сетях является наличие индуктивных и емкостных элементов, которые в процессе переключений могут создавать колебательные контуры. Ярко выраженным индуктивным характером обладают силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы, трансформаторы напряжения, линейные вольтодобавочные трансформаторы и другое оборудование с массивной обмоткой. Условием возникновения феррорезонансных процессов является наличие в сети несимметрии, которая приводит к возникновению напряжения смещения нейтрали.

Значительной емкостью в электрических сетях обладают разветвленные высоковольтные линии электропередач, ошиновка подстанций, конденсаторы шунтирующие разрывы высоковольтных выключателей.

Феррорезонансным перенапряжением является резонанс напряжений, который сопровождается увеличением напряжения на емкости и на всех соединённых с этой емкостью элементах сети при последовательном соединении емкости и индуктивности с источником переменного напряжения [44].

В случае если ёмкость и индуктивность ферромагнитного элемента соединены параллельно с источником переменного напряжения, то возникает резонанс токов, сопровождающийся существенным увеличением в индуктивности и ёмкости сети. В этом случае говорят о феррорезонансных сверхтоках [25].

Для возникновения феррорезонансных процессов необходимо и достаточно наличие двух условий:

1. токи должны быть достаточны для перехода кривых намагничивания за колено насыщения;
2. входное сопротивление сети, подключенной к зажимам обмотки, должно иметь емкостный характер.

Наиболее опасными в отношении феррорезонансных перенапряжений являются режим холостого хода или режим преобладания реактивной нагрузки [46], по причине того, что активные составляющие входных сопротивлений, как

подключенной сети, так и самой обмотки демпфируют феррорезонансные колебания.

Наиболее вреден режим с периодом системы. Характерны также субгармонические режимы на $1/3$ и $1/5$ частоты с меньшими действующими токами. Значительное количество аварий в энергосистемах с неустановленными причинами объясняется феррорезонансом.

Феррорезонанс может быть инициирован в результате подключений, отключений, переходных процессов, грозových перенапряжений, то есть при смене режима работы сети, при авариях, либо в результате внешнего воздействия. Работа сети в режиме феррорезонанса может долгое время оставаться незамеченной.

При феррорезонансе нередко повреждаются электромагнитные трансформаторы напряжения, из-за чрезмерного тока и перегрева. Технические меры по предотвращению аварий заключаются в основном во временном или постоянном увеличении активных потерь в резонансном контуре. Тем самым удастся прекратить феррорезонанс или не допустить его возникновения. Намеренное увеличение потерь, в частности, может достигаться выбором конструкции трансформатора, когда магнитопровод частично выполняется из толстолистовой конструкционной стали.

4.2 Феррорезонансные процессы при неполнофазных режимах

В сетях с изолированной нейтралью феррорезонанс может развиваться в полнофазных режимах работы сети при наличии индуктивности с насыщающимся сердечником. Такой индуктивностью часто оказывается обмотка трансформатора напряжения [20]. Но чаще всего возникновение перенапряжений связано с неполнофазными режимами – например, при обрыве фазного провода, при отключении электродвигателя или ненагруженного понижающего трансформатора коммутационным аппаратом при одновременном отключении трёх фаз. Феррорезонансные перенапряжения могут возникать на основной частоте, высших гармониках и субгармониках. Исходя из результатов исследо-

ваний и опыта эксплуатации промышленных сетей, значительные феррорезонансные перенапряжения возникают, в основном, на промышленной частоте.

Если единственным нелинейным элементом схемы является индуктивность с насыщающимся сердечником, то анализ феррорезонансных перенапряжений для одной гармонической тока напряжения (для составляющих тока и напряжений промышленной частоты) может быть проведен на примере простейшей схемы колебательного контура (рисунок 7).

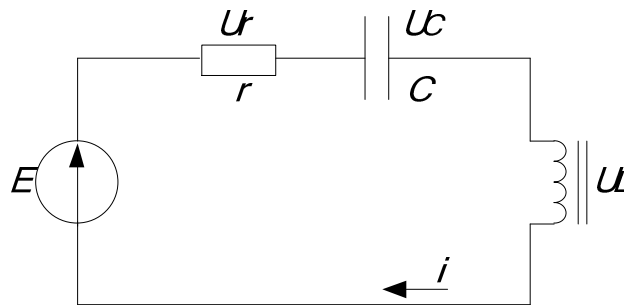


Рисунок 7 – Схема простейшего колебательного контура с нелинейной индуктивностью

Без учета активного сопротивления:

$$E = U_L + U_C \quad (10)$$

где E – ЭДС,

U_L – напряжение на индуктивности,

U_C – напряжение на емкости.

Напряжения на индуктивности и напряжение на ёмкости находятся в противофазе. При индуктивном режиме, когда $U_L > U_C$, ток в цепи отстает от ЭДС на 90° , поэтому:

$$U_L = E + U_C \quad (11)$$

При емкостном режиме, когда $U_C > U_L$, ток в цепи опережает ЭДС на 90° . Для этого случая справедливо выражение:

$$U_L = -E + U_C \quad (12)$$

Следует учесть, что при постоянной емкости напряжение на емкости линейно зависит от тока, так как:

$$U_C = \frac{I}{\omega \cdot C} \quad (13)$$

При наличии активного сопротивления уравнение Кирхгофа записывается в следующем виде:

$$E = U_L + U_C + U_r \quad (14)$$

Используя векторную диаграмму цепи, уравнение (12) можно записать иначе:

$$E = \sqrt{(U_L + U_C)^2 + (I_r)^2}, \quad (15)$$

Откуда следует:

$$U_L = f(I) = \sqrt{E^2 + (I_r)^2} + U_C^2 \quad (16)$$

Расчет нелинейных цепей может быть проведен графоаналитическим методом на основе вольтамперных характеристик. Главную роль в кривых напряжения и тока играет основная гармоника, поэтому ошибка, которую дает метод из-за наличия высших гармоник, при определении амплитуды напряжения невелика.

На (рисунке 8) показана вольтамперная характеристика нелинейной индуктивности и проведена прямая, которая соответствует зависимости $U_C = f(I)$. Их пересечение определяет возможные режимы в цепи.

При достаточно больших значениях емкости C прямые $E + U_C$ и $-E + U_C$ пересекают вольтамперную характеристику $E + U_C$ в трёх точках (рисунок 9). При меньших значениях емкости C (пунктирные прямые) пересечение возможно только в одной точке. В этом случае в цепи возможен только емкостный режим (прямая $E + U_C$ не имеет точки пересечения с $U_L = f(I)$).

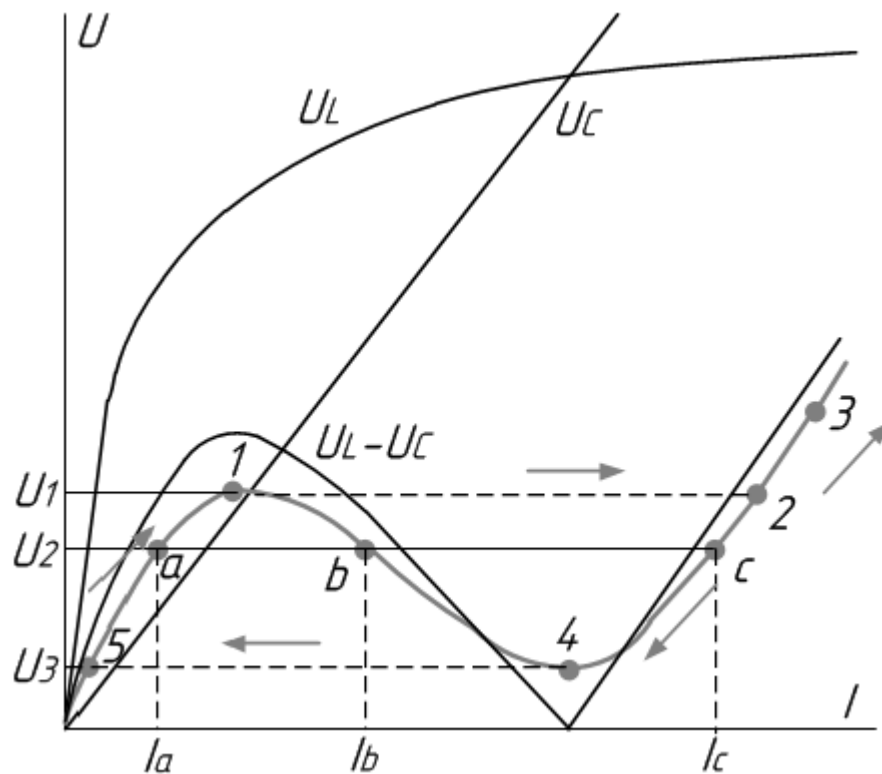


Рисунок 8 – Графоаналитический метод определения напряжения

Устойчивые режимы в точках a и b могут существовать с одинаковой вероятностью. Они отличаются величиной U_C (в точке a U_C значительно больше по сравнению с напряжением U_C в точке b) и фазой тока I в цепи по отношению к ЭДС E . При случайных возмущениях в цепи возможен переход, например, из точки b в точку a . Такой переход называется феррорезонансным скачком, так как такое явление наблюдается только в нелинейных цепях, в частности в цепях с нелинейной индуктивностью. Одновременно при скачке происходит "опрокидывание фазы" – изменение фазы тока I . Как указано в [25], установление прямого чередования фаз приводит к длительному повышению напряжения до $(2,2-2,3) \times U_{\phi}$ и вызывает перегорание предохранителей ТН. При обратном чередовании (опрокидывании фазы) происходит повышение одного из фазных напряжений до $(3,8-4,2) \times U_{\phi}$.

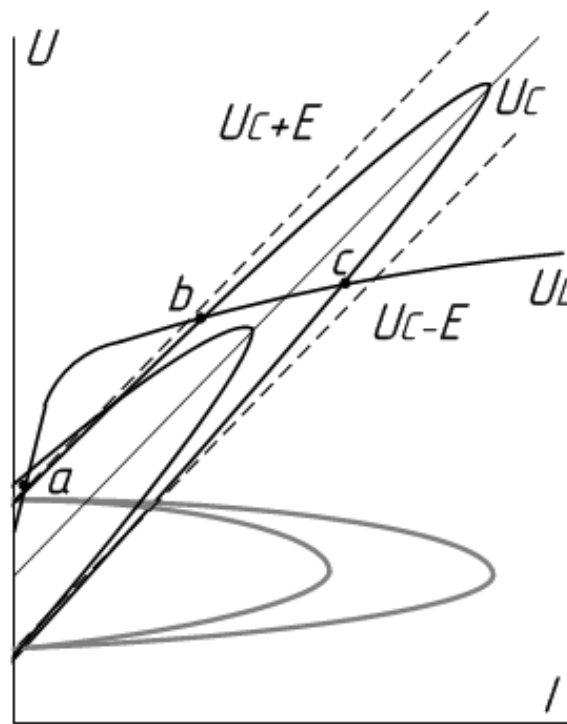


Рисунок 9 – Расчет напряжений с учетом активного сопротивления

Первое слагаемое в (14) представляет собой эллипс с полуосями E и E/r . Сумма ординат этого эллипса и прямой $UC=I/wC$ дает правую часть (рисунок 3). Точки пересечения получившейся от суммирования кривой с вольтамперной характеристикой катушки определяют все возможные состояния равновесия схемы (рисунок 3), одно из трех возможных решений (точка ϵ) является неустойчивым.

При малых значениях сопротивления $r \ll I/wC$ возможны три точки пересечения, при очень больших r (пунктир в правой части графика на рисунке 3) оказывается возможным только одно установившееся состояние, соответствующее индуктивному режиму с малым напряжением U_C . Поэтому, достаточно большое по величине активное сопротивление способно ограничивать максимально возможную величину перенапряжений при феррорезонансе.

4.3 Феррорезонансные процессы в цепях трансформаторов напряжения контроля изоляции

Основной причиной повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции является существование в сети феррорезонансных явлений. Для фер-

порезонанса характерно равенство емкостного сопротивления сети и индуктивного сопротивления трансформатора.

В сетях 6-35 кВ наблюдались случаи быстрого повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции. Через доли минуты после возникновения однофазного замыкания на землю трансформатор напряжения начинал дымить и выходил из строя. Такие случаи наблюдаются при несимметричных режимах в сети. Вскрытие поврежденных трансформаторов напряжения выявляло обугливание изоляции обмотки высокого напряжения одной из фаз. Такие повреждения возможны только при четырехкратном непрерывном перевозбуждении трансформатора, что характерно для феррорезонансных процессов. Тепловое разрушение трансформатора происходит из-за увеличения действующего значения тока, проходящего через ТН, при зажигании-гашении емкостной дуги, возникающей при ОЗЗ. Емкостная дуга при ОЗЗ может сопровождаться многочисленными гашениями и зажиганиями – иметь перемежающийся характер. Перемежающаяся дуга создает постоянную составляющую в напряжениях на фазах сети и ТН, что приводит к насыщению магнитопровода ТН. Процесс заряда емкостей сети с их последующим разрядом через обмотки насыщенного ТН повторяется в каждом цикле зажигания–гашения дуги [18].

5 СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Способы защиты электрических сетей от перенапряжений разделяются на два вида: превентивные и коммутационные. Превентивные меры защиты постоянно оказывают влияние на сеть. Они предназначены для предотвращения возникновения перенапряжений или для ограничения их величины. К таким мерам защиты в сетях 6-35 кВ относятся заземление нейтрали трансформатора через ДГР и резистивное заземление нейтрали.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений содержат в себе коммутирующие элементы, которые срабатывают, когда перенапряжение в точке их установки превысит некоторую критическую величину [36]. К коммутационным средствам защиты от перенапряжений относятся ограничители перенапряжений нелинейные, разрядники, защитные промежутки.

Одним из основных способов уменьшения ущерба от феррорезонанса является применение антирезонансных ТН. Антирезонансным называют электромагнитный заземляемый ТН, устойчиво работающий при наличии в сети непрекращающихся феррорезонансных явлений и не вызывающий их [44].

5.1 Превентивные меры защиты от перенапряжений

В настоящее время для снижения перенапряжений в распределительных сетях 6-35 кВ находит применение режим резистивного заземления нейтрали сети. Согласно [35], при оптимальных параметрах заземляющего резистора, такой режим позволяет обеспечивать высокую чувствительность защиты от замыканий на землю и уменьшить возникающие перенапряжения.

Определение величины сопротивления резистора приведено в п. 2.3. Эффективное снижение перенапряжений зависит не только от величины сопротивления резистора, но и от места заземления.

Как отмечено выше, в сетях с компенсацией емкостных токов благоприятные условия протекания переходных процессов при однофазных замыканиях на землю создаются при резонансной настройке, когда емкостное сопротивление на землю равно индуктивному сопротивлению реактора. Так как емкость

сети непостоянна, необходимо использовать системы автоматической настройки компенсации.

Основой конструкции устройств автоматической настройки компенсации является блок конденсаторных батарей, который подключается к вспомогательной обмотке ДГР. Настройка реактора происходит путем переключения конденсаторных элементов разного номинала, вследствие чего изменяется эквивалентная индуктивность реактора. При отключении одного из фидеров величина емкостной утечки сети снижается и для резонансной настройки ДГР подключается необходимое количество емкостных элементов. И наоборот, когда фидер подключается, отключается необходимое количество емкостных элементов. Для эффективного снижения величины емкостного тока, протекающего в месте повреждения во время однофазного замыкания на землю, дугогасящий реактор должен быть настроен в резонанс с емкостью сети в течение всего времени замыкания.

Как указано в [45], при несимметричных режимах, сопровождающихся резонансными перенапряжениями, снижение перенапряжений в сети с компенсацией емкостных токов, может быть осуществлено путем подключения высокоомного резистора параллельно дугогасящему реактору. В этом случае значение сопротивления резистора определяется величиной некомпенсированного тока замыкания на землю. Такой способ заземления называется комбинированным резистивно-индуктивным заземлением нейтрали.

Применяют два варианта такого заземления:

- Резистор и ДГР включены параллельно и постоянно.
- Резистор включается параллельно ДГР кратковременно при возникновении ОЗЗ для обеспечения надежного срабатывания защит.

5.2 Коммутационные средства защиты от перенапряжений

5.2.1 Ограничители перенапряжений нелинейные

Одними из основных коммутационных средств защиты являются ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) рисунок 10). ОПН предназначены, в основном, для ограничения коммутационных и грозовых перенапряжений.

Конструкция ОПН представлена на рисунке 1.

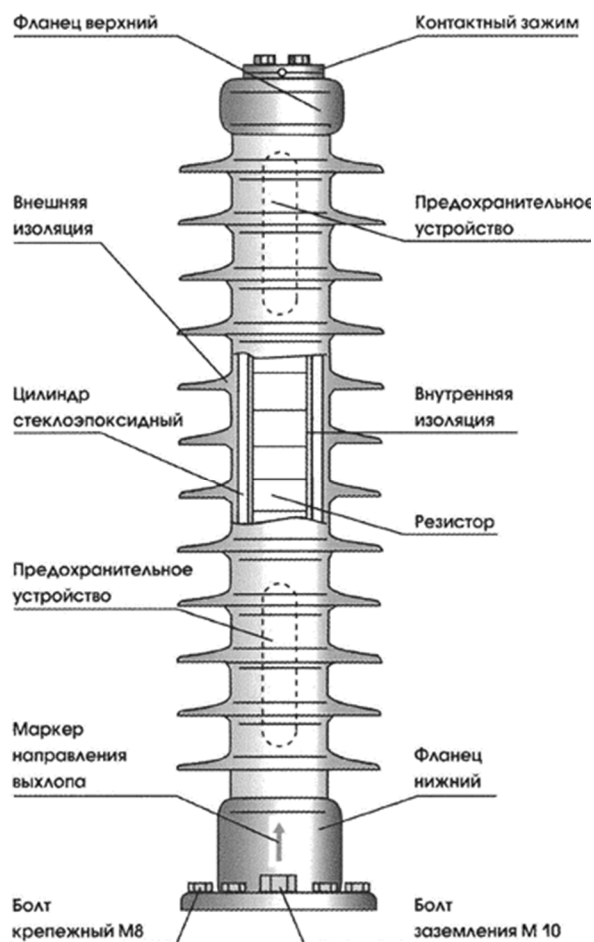


Рисунок 10 – Конструкция ОПН

Основным элементом устройства является варистор. Варистор выполняет роль нелинейного переменного резистора. Варисторы размещены в корпусе, выполненном из фарфора или полимера, и последовательно соединены в колонку. В зависимости от требуемых характеристик ОПН может состоять из одной колонки или нескольких, соединенных последовательно или параллельно. Для подключения к токоведущей шине используется контактный болт, расположенный на крышке ограничителя перенапряжений. ОПН снабжён изолированной от земли плитой основания. Внутренняя стеклопластиковая труба, мембраны и крышки обеспечивают взрывобезопасность конструкции при прохождении токов короткого замыкания.

В нормальном рабочем режиме через ограничитель протекает емкостный ток, который составляет десятые доли миллиампера. При возникновении пере-

напряжений резисторы ОПН переходят в проводящее состояние и ограничивают нарастание перенапряжения до безопасного для изоляции защищаемой электроустановки уровня. Когда перенапряжение снижается, ограничитель вновь возвращается в непроводящее состояние.

При использовании ОПН будет исключена возможность длительных резонансных и феррорезонансных перенапряжений в точке его установки. ОПН позволяет ограничить кратности дуговых перенапряжений до уровня $2,7 - 2,8U_{\Phi}$.

Особенностью применения ОПН в сетях с заземленной через ДГР нейтралью является необходимость исключить резонансные повышения напряжения из-за смещения нейтрали, которые в случае их появления выведут ОПН из строя. Для работы ОПН в таких сетях при многократных дуговых замыканиях характерна меньшая частота их срабатывания, которая зависит от степени расстройки компенсации.

При высокоомном заземлении нейтрали из-за уменьшения числа повторных зажиганий дуги снижается рассеиваемая энергия в варисторах ОПН.

В случае использования комбинированного резистивно-индуктивного заземления нейтрали сети количество и кратность дуговых перенапряжений снижается, что увеличивает срок службы ОПН.

5.2.2 Антирезонансные трансформаторы напряжения

Антирезонансные трансформаторы напряжения разработаны для защиты ТН от феррорезонансных процессов, приводящих к перегреву и повреждению обмоток.

К антирезонансным ТН, работающим в сетях 6-35 кВ предъявляют следующие требования:

- 1.) не должны вызывать устойчивого феррорезонанса;
- 2.) не должны повреждаться при длительных однофазных замыканиях сети на землю через перемежающуюся дугу;
- 3.) не должны повреждаться при устойчивом феррорезонансе емкости сети с нелинейной индуктивностью других трансформаторов [44].

Для обеспечения антирезонансных свойств у ТН 6–35 кВ применяются несколько способов:

- 1.) добавление в схему активных гасительных сопротивлений;
- 2.) повышение потокосцепления насыщения путем снижения номинальной индукции;
- 3.) изменение схемы соединения обмоток трехфазных ТН и т.д. [24].

В настоящее время выпускаются две разновидности масляных антирезонансных ТН: НАМИ-10-95 и НАМИ-35; НАМИТ-10. Оба вида предусматривают наличие в одном баке трехфазного и однофазного трансформаторов. Первичная обмотка однофазного трансформатора включена между нейтралью обмоток трехфазного трансформатора и землей. Отличие состоит в том, что у НАМИ вторичная обмотка однофазного ТН всегда разомкнута, а у НАМИТ в нормальном режиме она короткозамкнута, размыкается только при резонансе в сети. Механизм размыкания вторичной обмотки состоит из реле обнаружения феррорезонанса и реле дешунтирования обмотки. Если набор реле отсутствует, то вторичная обмотка постоянна замкнута. Таким образом, короткозамкнутый однофазный трансформатор используется как балластное сопротивление в нейтрали группы однофазных ТН.

Трехфазный стержневой трансформатор НАМИТ-10-2 представляет собой соединенные конструктивно в единое целое два трансформатора напряжения:

1.) ТНКИ – трансформатор напряжения контроля изоляции, трехобмоточный, первичные обмотки которого включены по схеме «звезда». Предназначен для питания цепей измерительных приборов учета электрической энергии, для цепей защиты и контроля изоляции.

2.) ТНП – трансформатор нулевой последовательности, двухобмоточный, первичная обмотка которого включена в нейтраль ТНКИ и заземлена, вторичная обмотка замкнута. При появлении феррорезонанса обмотка, замкнутая в треугольник, размыкается автоматически.

Антирезонансные свойства достигаются введением в первичную цепь, связанную с землей, индуктивного сопротивления в виде трансформатора нулевой последовательности (ТНП). Введение этого сопротивления выполняется путем дешунтирования его вторичной обмотки с помощью схемы РЗ. Этот трансформатор подвержен феррорезонансным явлениям.

Так же выпускаются литые трехфазные трансформаторы типа ЗНОЛ. В таких трансформаторах в нейтраль первичной обмотки дополнительно включается резистор сопротивлением 800 – 1000 Ом. Но такие трансформаторы недостаточно надежны из-за несовершенства схемы соединения обмоток.

Для снижения влияния феррорезонансных процессов на работу электрооборудования необходимо принимать меры к их предотвращению. Наиболее эффективными средствами по решению этой проблемы является:

- включение в цепь разомкнутого треугольника сопротивления 25 Ом, рассчитанного на длительное протекание тока 4А.

- включение параллельно емкости нулевой последовательности сети активного сопротивления также играет большую роль в снижении дуговых и феррорезонансных перенапряжений и увеличении надежности работы изоляции оборудования сети.

- заземление нейтрали сети через дугогасящий реактор или через низкоомное активное сопротивление полностью, а высокоомное заземление нейтрали в подавляющем большинстве случаев, исключают возникновение феррорезонанса на измерительных трансформаторах напряжения.

6 РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОЗЗ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ 6-35 КВ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА СЕТИ 35 КВ ЭНЕРГОРАЙОНА ЕАО

6.1 Структурный анализ участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО

Построение иерархической структуры сети

Рассмотрим участок электрической сети 35 кВ энергорайона ЕАО (рисунок 11).

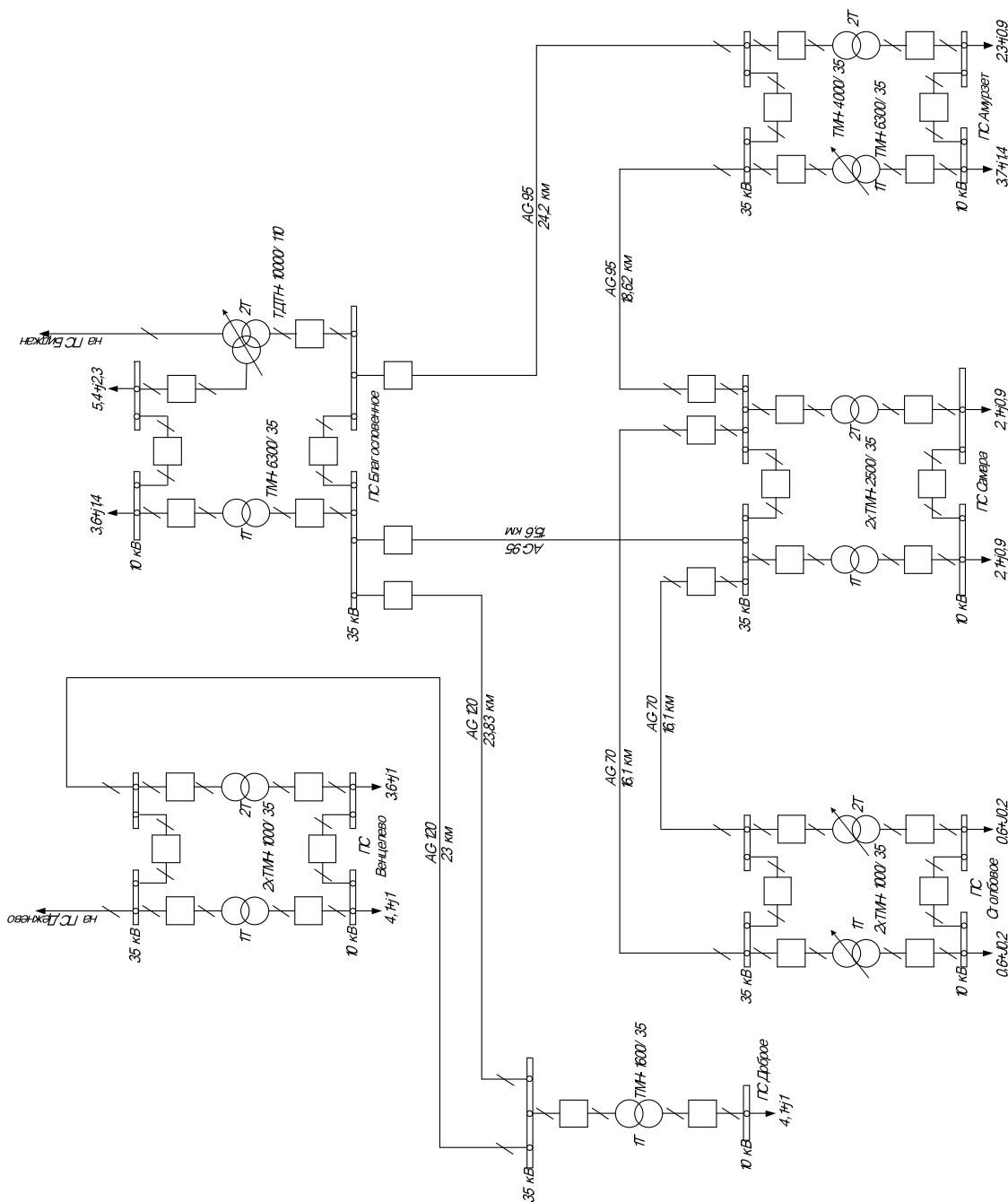


Рисунок 11 – Рассматриваемый участок сети

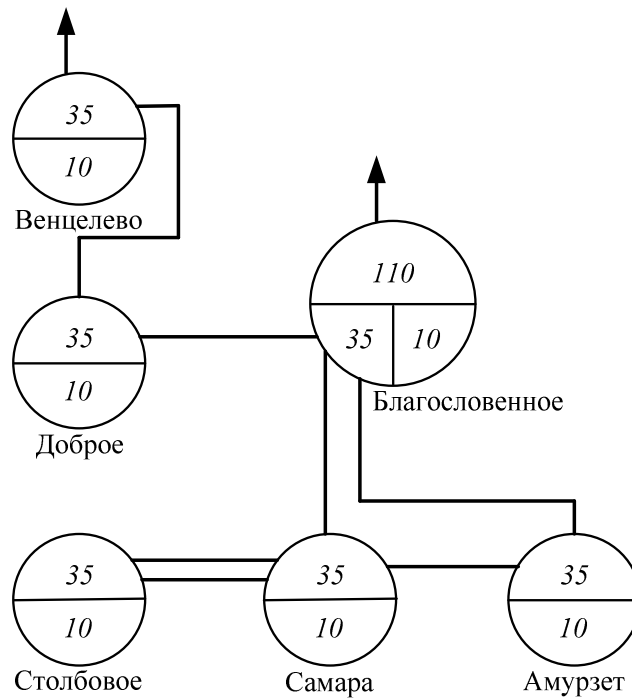


Рисунок 12 – Иерархическая структура сети

6.1.1 Структурный анализ питающей подстанции

Выделяем питающую подстанцию «Благословенное».

Составляем главную схему питающей подстанции «Благословенное».

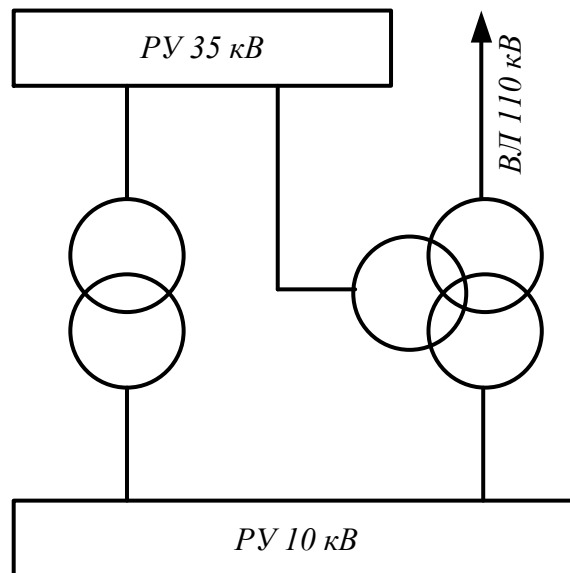


Рисунок 13 – Схема питающей подстанции

Уровни номинального напряжения: 110 кВ, 35 кВ, 10 кВ

Тип и мощность трансформаторов:

Источник питания состоит из двух трансформаторов:

ТМН-6300/35/10

Основные характеристики:

$$S_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{XX}} = 0,8 \%$$

$$\Delta P_{\text{K}} = 46,5 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{X}} = 8 \text{ кВт}$$

$$k_{\text{T}} = 0,314$$

ТДТН-10000/110/35/10

Основные характеристики:

$$S_{\text{НОМ}} = 10000 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{XX}} = 0,5 \%$$

$$\Delta P_{\text{K}} = 70 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{X}} = 12 \text{ кВт}$$

$$k_{\text{T1}} = 0,096, k_{\text{T2}} = 0,335$$

Описание распределительных устройств

ОРУ ВН 35 кВ:

номер схемы – 9 (Схема с одной рабочей секционированной выключателем системой шин)

количество ячеек: линейные 3 шт, трансформаторные 2 шт, секционная 1 шт.

ОРУ НН 10 кВ:

номер схемы – 9 (Схема с одной рабочей секционированной выключателем системой шин)

количество ячеек: линейные 2 шт, трансформаторные 2 шт, секционная 1 шт.

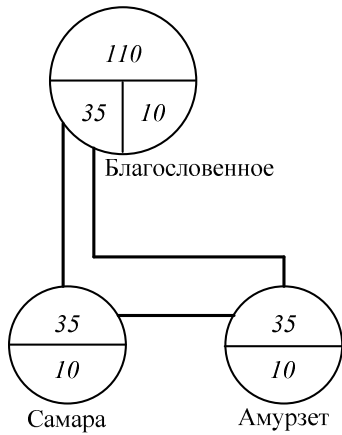
На схеме электрической сети не указаны марки выключателей, но, как известно, на напряжение 35, 10 кВ преимущественно устанавливаются вакуумные выключатели.

6.1.2 Структурный анализ электроэнергетической сети

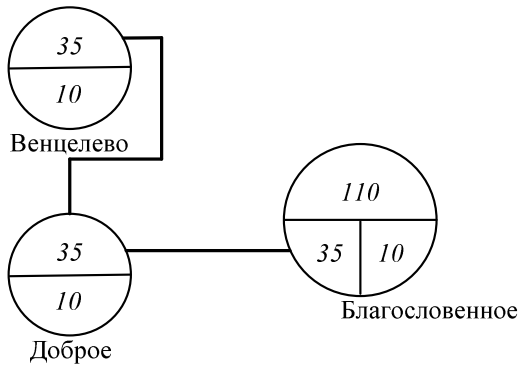
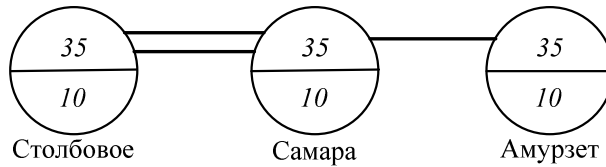
Тип сети: Данная схема является сложно замкнутой.

Выделение контуров:

Кольцевая:



Магистральная:



6.1.3 Структурный анализ ЛЭП

Тип линий

Тип линий, используемых в системе, и их основные характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики проводов

Напряжение, кВ	Марка	R_0 , Ом/км	X_0 Ом/км	B_0 , мкСм/км	Q_0 , МВар
1	2	3	4	5	6
35	АС-120/19	0,249	0,414	-	-
	АС-95/16	0,306	0,421	-	-
	АС-70/11	0,428	0,432	-	-

В таблице 4 представлена группировка линий сети по напряжению и сечениям и суммарная длина линий с одинаковыми сечениями.

Таблица 4 – Воздушные линии

Напряжение, кВ	Марка	Суммарная длина линий, км	Наименование линий
1	2	3	4
35	АС-120/19	46,83	Венцелово – Доброе, Доброе – Благословенное
	АС-95/16	58,42	Благословенное – Амурзет, Благословенное – Самара, Самара – Амурзет
	АС-70/11	32,2	Самара – Столбовое I цепь, Самара – Столбовое II цепь

Суммарная длина линий сети 35 кВ составляет 137,45 км.

Интервальная оценка сечений линий

Напряжение 35 кВ: АС-70 – АС-120

6.1.4 Структурный анализ подстанций

В таблице 5 представлена группировка подстанций рассматриваемой сети по типу.

Таблица 5 – Типы подстанций

Наименование подстанции	Тип подстанции	Тип трансформатора	U, кВ	Вид РУ
1	2	3	4	5
ПС Благословенное	Узловая	ТДТН-10000/110 ТМН-6300/35	110 35	9
ПС Самара	Узловая	2хТМН-2500/35	35	9
ПС Амурзет	Проходная	ТМН-6300/35 ТМН-4000/35	35 35	5АН
ПС Доброе	Проходная	ТМН-1600/35	35	9
ПС Венцелово	Проходная	2хТМН-1600/35	35	9
ПС Столбовое	Проходная	2хТМН-1000/35	35	5АН

Следует отметить, что рассматриваемая сеть работает в режиме изолированной нейтрали.

6.2 Выбор и обоснование способа ограничения перенапряжений при ОЗЗ рассматриваемого участка сети

Как отмечено выше, рассматриваемый участок сети 35 кВ работает в режиме изолированной нейтрали, кратность перенапряжений при которой, соответственно данным из таблицы 1, приведенной в п. 2.4, составляет $3,0 - 3,5U_{\phi}$, а при феррорезонансных перенапряжениях кратности могут достигать более высоких значений. В качестве способа снижения перенапряжений целесообразно перевести рассматриваемую сеть на работу в режиме резистивного заземления нейтрали, что позволит снизить возникающие при ОЗЗ перенапряжения до приблизительного уровня $2,2 - 2,5U_{\phi}$.

Далее необходимо определить вид резистивного заземления – высокоомное или низкоомное. Выбор может быть произведен, исходя из категории надежности электроснабжения потребителей рассматриваемой сети. Надежность электроснабжения непосредственно связана с обеспечением его бесперебойности. Как указано в [18], в режиме ОЗЗ бесперебойность электроснабжения определяется действием релейной защиты при данном повреждении сети на отключение или на сигнал. Если схема электроснабжения достаточно надежна и имеется несколько независимых источников питания, что характерно для первой и второй категории надежности электроснабжения потребителей [21], то необходимо использовать режим низкоомного заземления нейтрали, при котором РЗ действует на отключение, что повысит надежность функционирования сети.

Для потребителей третьей категории надежности электроснабжения питание осуществляется от одного источника, поэтому в этом случае для обеспечения бесперебойности электроснабжения целесообразно сохранить режим ОЗЗ и использовать действие РЗ на сигнал, что характерно для высокоомного заземления нейтрали сети.

Потребители рассматриваемой сети относятся к третьей категории надежности электроснабжения, поэтому для обеспечения бесперебойности

электроснабжения предлагается использовать режим высокоомного заземления нейтрали.

6.3 Реализация режима высокоомного резистивного заземления нейтрали участка сети 35 кВ энергорайона ЕАО

Для перевода рассматриваемой сети 35 кВ на режим высокоомного резистивного заземления нейтрали необходимо рассчитать значение сопротивления заземляющего резистора, выбрать место его установки и схему включения в сеть.

Заземляющий резистор необходимо подключать в нейтраль трансформатора питающей подстанции. Как видно из структурного анализа (п. 4.1), питающей подстанцией рассматриваемого участка сети является ПС «Благословенное».

Высоковольтный заземляющий резистор может подключаться либо к нейтрали обмотки высшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора, либо непосредственно к нейтрали обмотки силового трансформатора, питающего данную сеть [21].

Так как в качестве нейтралеобразующих трансформаторов могут быть использованы трансформаторы со схемой соединения обмоток $Y0/\Delta$, то в данном случае целесообразно подключить заземляющий резистор в нейтраль питающего трансформатора ТДТН-10000/110/35, как показано на рисунке 7.

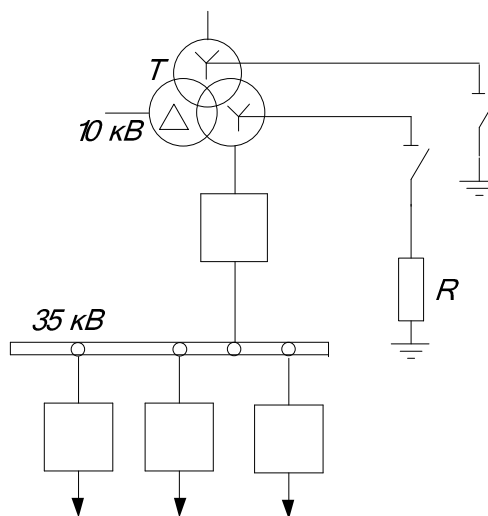


Рисунок 14 – Схема включения заземляющего резистора

Для выбора сопротивления заземляющего резистора необходимо рассчитать емкостный ток сети. От шин 35 кВ ПС «Благословенное» отходит три линии. Емкостный ток сети будет равен сумме емкостных токов отходящих линий:

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3}. \quad (17)$$

Емкости линий составляют: $C_1=115,4$ пФ, $C_2=80,4$ пФ, $C_3=123,7$ пФ.

Для расчета емкостных токов линий используется формула (7):

$$I_{C1} = 3 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 115,4 \cdot 35 / \sqrt{3} = 2,2 \text{ А},$$

$$I_{C2} = 3 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 80,4 \cdot 35 / \sqrt{3} = 1,5 \text{ А},$$

$$I_{C3} = 3 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 123,7 \cdot 35 / \sqrt{3} = 2,4 \text{ А}.$$

Суммарный емкостный ток:

$$I_C = 2,2 + 1,5 + 2,4 = 6,1 \text{ А}.$$

Исходя из условия (6), сопротивление резистора определяется по следующей формуле:

$$R_N \leq \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot I_C}, \quad (18)$$

$$R_N \leq \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 6,1} = 3312 \text{ Ом}.$$

Можно принять $R_N=3000$ Ом.

Тогда активная составляющая тока ОЗЗ:

$$I_R = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot R_N}, \quad (19)$$

$$I_R = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 3000} = 6,7 \text{ А}.$$

Условие (6) выполняется.

Ток ОЗЗ определяется по формуле (2):

$$I_{OЗЗ} = \sqrt{6,1^2 + 6,7^2} = 9 \text{ А}.$$

При этом должно выполняться следующее условие:

$$I_{OЗЗ} \geq \sqrt{2} \cdot I_C, \quad (20)$$

То есть в рассматриваемом случае ток ОЗЗ не должен превышать 8,6 А. Условие (20) выполняется.

К установке принят заземляющий резистор типа РЗ для заземления нейтрали сетей 6-35 кВ производства ООО «ПНП Болид» [46]. Резистор серии РЗ конструктивно выполняется из одного или нескольких унифицированных резистивных блоков (рисунок 8).

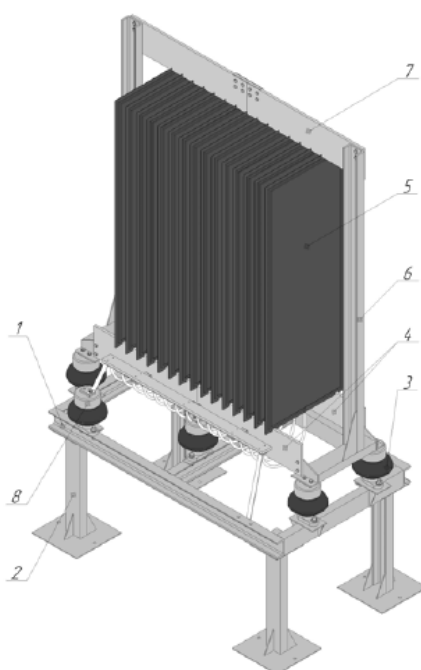


Рисунок 15 – Унифицированный резистивный блок

1 – основание, 2 – опорные стойки, 3 – опорные изоляторы, 4 – изоляционные пластины, 5 – элементы резистора защитного, 6 – вертикальные стойки, 7 – изоляционные пластины, 8 – изолятор для подключения подвода от нейтрали сети

Основание (1) установлено на четырех опорных стойках (2). На основании установлены опорные изоляторы (3). Закрепленные на изоляторах изоляционные пластины (4) используются как опора для элементов резистора защитного (ЭРЗ) (5). В жестко закрепленных на изоляторах вертикальных стойках (6) установлена регулируемая по высоте изоляционная пластина (7), с помощью которой производится фиксация сверху элементов резистора ЭРЗ.

Основные характеристики резистора приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики высокоомного резистора типа РЗ

Напряжение, кВ	Номинал резистора, Ом	Количество блоков	Число ЭРЗ	Мощность резистора, не более, кВт
1	2	3	4	5
35	2300 – 3400	6	180	178

Резистор необходимо располагать на свободной площади ОРУ. Подключение подвода резистора к нейтрали сети осуществляется с помощью кабеля, присоединяемого к нижнему изолятору. Подключение резистора выполняется через разъединитель с целью отключения резистора для осмотра и технического обслуживания. Конструкция резистора устанавливается на фундаментные опоры. Заземление блока резистивных элементов выполняется присоединением заземляющего проводника от общего контура заземления электроустановки к болтам заземления блока.

6.4 Организация релейной защиты от ОЗЗ при высокоомном резистивном заземлении нейтрали сети 35 кВ

В сетях с высокоомным заземлением нейтрали защиты от замыканий на землю должны работать на обнаружение и сигнал.

Значение активной составляющей тока ОЗЗ для высокоомного заземления нейтрали выбирается из следующего условия:

$$I_R \geq \sqrt{(I_{C3\max} \cdot k_{\min} / I_C)^2 - 1} \quad (21)$$

где I_C – емкостный ток ОЗЗ сети, А;

$I_{C3\max}$ – наибольший из токов срабатывания защит при ОЗЗ, А;

k_{\min} – наименьшее допустимое значение коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ;

При высокоомном режиме заземления нейтрали сложно быстро и селективно выявить ОЗЗ, что ведет к усложнению и удорожанию РЗ от ОЗЗ.

Согласно [39], для защиты (сигнализации) при ОЗЗ в сети с резистивно заземленной нейтралью используются следующие принципы:

- измерение напряжения нулевой последовательности $3U_0$,

- измерение тока нулевой последовательности $3I_0$ промышленной частоты (50 Гц).

6.4.1 Устройство контроля изоляции

Устройство контроля изоляции предназначено для фиксирования возникновения ОЗЗ по напряжению нулевой последовательности. Устройства контроля изоляции выполняются с использованием трансформаторов напряжения. На питающих подстанциях устанавливаются трехобмоточные ТН первичной, вторичной и дополнительной, соединенной по схеме «разомкнутый треугольник», обмотками [39].

Один из способов выполнения устройства контроля изоляции заключается в использовании трех вольтметров, которые включаются на фазные напряжения вторичной обмотки ТН. В нормальном симметричном режиме все три вольтметра показывают одинаковые значения фазных напряжений. При однофазном замыкании на землю показания вольтметра поврежденной фазы снижаются практически до нуля, а показания вольтметров неповрежденных фаз увеличиваются. Для получения звукового сигнала при ОЗЗ в схему устройства необходимо подключить сигнальное реле. Сигнальное реле срабатывает под влиянием напряжения нулевой точки вольтметров, равного сумме напряжений неповрежденных фаз при замыкании одной фазы на землю.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения определяется по формуле:

$$U_{CP} = \frac{U_{\min \text{ раб. ф.}}}{k_n}, \quad (22)$$

где $U_{\min \text{ раб. ф.}}$ – минимальное рабочее фазное напряжение сети;

k_n – коэффициент надежности (принимается 1,1 – 1,2).

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения:

$$U_{CP} = k_n \cdot U_{\text{нб}}, \quad (23)$$

где $U_{\text{нб}}$ – напряжение небаланса, не превышающее 2-3% номинального напряжения.

6.4.2 Токовая защита нулевой последовательности

В сетях 6 – 35 кВ, работающих в режиме резистивного заземления нейтрали, применяется токовая защита, реагирующая на действующее значение полного тока нулевой последовательности промышленной частоты.

Как указано в [39], ток срабатывания защиты выбирается из условия несрабатывания при внешнем ОЗЗ:

$$I_{C3} \geq k_n \cdot k_{бр} \cdot I_{Cmax}, \quad (24)$$

где I_{C3} – ток срабатывания защиты, А;

k_n – коэффициент надежности (принимается приблизительно 1,2);

$k_{бр}$ – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ;

I_{Cmax} – емкостный ток линии.

Ток срабатывания защиты нужно принять меньше полученного значения, поэтому $I_{C3}=4$ А.

Условие срабатывания (чувствительности) при ОЗЗ на защищаемом присоединении:

$$k_v = \frac{I_{C\Sigma}}{I_{C3}} = 1,5 \div 2, \quad (25)$$

где $I_{C\Sigma}$ – суммарный емкостный ток сети.

Селективность срабатывания защиты именно на линии, где произошло ОЗЗ, обеспечивается за счет меньшего времени срабатывания, соответствующего большему значению суммарного тока по сравнению с емкостными токами каждой неповрежденной линии.

$$t \geq 5,8 - 1,35 \cdot \ln \left(\frac{I_{O33}}{k \cdot I_{C3}} \right), \quad (26)$$

где k – выставаемый коэффициент;

I_{O33} – ток замыкания на землю при ОЗЗ.

После отключения поврежденной линии защиты неповрежденных линий автоматически возвращаются в исходное положение [39].

Если необходимо, чтобы защита от ОЗЗ действовала на сигнал, то после срабатывания защиты поврежденного присоединения нужно выполнить специальную коммутацию для блокировки защит неповрежденных присоединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации был произведен анализ теоретических и экспериментальных исследований в области дуговых и феррорезонансных перенапряжений в сетях 6-35 кВ, возникающих при однофазных замыканиях на землю. В результате выявлено, что дуговые и феррорезонансные перенапряжения представляют серьезную опасность для сетей напряжением 6-35 кВ.

В работе рассмотрены различные режимы работы нейтрали сети и их влияние на величину перенапряжений. Выявлено, что самым неблагоприятным режимом работы нейтрали сети является режим изолированной нейтрали, при котором возникают значительные перенапряжения. Резистивное заземление нейтрали и заземление нейтрали через дугогасящий реактор являются наиболее эффективными. Заземление нейтрали через ДГР позволяет снизить кратности перенапряжений до уровня $2,6 - 2,8U_{\phi}$. При резистивном заземлении нейтрали кратности перенапряжений составят $2,2 - 2,5U_{\phi}$.

Для создания благоприятных условий протекания процессов при ОЗЗ в сетях с компенсацией емкостных токов с помощью ДГР требуется автоматическая настройка компенсации, что в настоящее время трудно осуществимо.

Существует два вида резистивного заземления нейтрали – высокоомное и низкоомное. Высокоомное заземление нейтрали позволяет сохранить режим ОЗЗ и тем самым обеспечить бесперебойность электроснабжения потребителей. В таком случае используется действие релейной защиты на сигнал.

При низкоомном заземлении нейтрали в сети создается активная составляющая тока ОЗЗ, достаточная для действия релейных защит на отключение поврежденного присоединения. Такой способ позволяет повысить надежность электроснабжения и в основном может быть использован, если в сети имеется несколько независимых источников питания.

В работе приведен структурный анализ рассматриваемого участка сети, в результате которого выявлено, что питание сети осуществляется от одного источника питания. Потребители данной сети относятся к третьей категории по

надежности электроснабжения. Рассмотренная сеть работает в режиме изолированной нейтрали.

В качестве способа снижения величины перенапряжений, возникающих при ОЗЗ, в рассмотренной сети 35 кВ предложен вариант перевода сети на работу в режиме высокоомного резистивного заземления нейтрали. Для реализации этого решения выбран резистор типа РЗ с величиной сопротивления 3000 Ом. Резистор целесообразно подключить в нейтраль питающего трансформатора ТДТН-10000/110/35 ПС «Благословенное». Выбранный резистор создает в месте замыкания активную составляющую тока, равную 6,7 А. Емкостный ток в сети составляет 6,1 А. Ток ОЗЗ в таком случае составит 9 А, что не превышает допустимого значения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Лихачев, Ф. А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220 кВ / Ф. А. Лихачев. – М. : Энергия, 1968. – 101 с.

2 Сиротинский, Л. И. Техника высоких напряжений / Л. И. Сиротинский. - М. : ЕЭИ, 1959. – 368 с.

3 Petersen, W. Die Begrenzung des Erdschlubstromes und die Unterdrückung des Erdschlub Lichtbogens durch die ErdscMubspule / W. Petersen - Mektrotechn. Ztschr. Jahrg. № 40, 2007 – s. 5 – 7

4 Peters, J. F. Voltage induced by arcing grounds / J. F. Peters, J. Slepian. – AIEE Transactions on power apparatus and systems, 2010 – p. 193

5 Джуварлы, Ч. М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью / Ч. М. Джуварлы. – Электричество № 6, 1953. – с. 18 – 27

6 Беляков, Н. Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Н. Н. Беляков. – Электричество, № 5, 1957. – с. 31 – 36

7 Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М. : Энергия, 1971. – 152с.

8 Зархи, И. М. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35кВ / И. М. Зархи, В. Н. Мешков, Ф. Х. Халилов. – Л. : Наука, 2009. – 128 с.

9 Лихачев, Ф. А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220 кВ / Ф. А. Лихачев. – М. : Энергия, 1968. – 101 с.

10 Кадомская, К. П. Процессы при однофазных дуговых замыканиях в сетях 6-35 кВ с учетом распределенности параметров воздушных линий / К. П. Кадомская, А. А. Тихонов, О. В. Цырикова, В. А. Куршиш. – Известия вузов. Энергетика, № 1/2, 1994. – с. 3 – 8

11 Евдокунин, Г. А. Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6-35 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземле-

нием нейтрали / Г. А. Евдокунин, С. С. Титенков. – «Электротехника 2010», 2010.

12 Евдокунин, Г. А. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений / под ред. Г. А. Евдокунина, А. И. Таджикибаева, Ф. Х. Халилова – Л. : С. Петербург: ПЭИпк, 1997. – 215 с.

13 Evdokunin, G. A. Choose of the way of neutral grounding in networks of 6-10 kV / G. A Evdokunin, S.S. Titenkov. – Proceedings of International conference on electric power quality and supply reliability, June 9. 12, Sagadi, 1999.

14 Джуварлы, Ч. М. Переходный процесс однофазного замыкания на землю в сетях 6-35 кВ при наличии токоограничивающих реакторов / Ч. М. Джуварлы, М. И. Абдуррахманов, Х. Н. Набиев. – Известия АН АзССР сер. физико-технических и математических наук, № 3, 1981.

15 Торосян, А. С. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с токоограничивающими реакторами / А. С. Торосян. – Электрические станции, №4, 1995. – с .34 – 42

16 Симаков, Ю. П. Ограничение дуговых и феррорезонансных перенапряжений при однофазных замыканиях на землю / Ю. П. Симаков, В. А. Мезгин, А. Н. Валькевич – Электроэнергетика, 2008.

17 Алексеев, В. Г. Феррорезонанс в сетях 6 – 10 кВ / В. Г. Алексеев, М. Х. Зихерман. – Электрические станции, № 1, 1978, - с. 63 – 65

18 Гусаков, Д. В. Феррорезонансные явления в цепях, включающих измерительные трансформаторы / Д. В. Гусаков. – Вестник УГАТУ, №2(72), 2016. – с. 106 – 110

19 Корепанов, А. А. Обоснование эффективности резистивного заземления нейтрали сетей 6(10) кВ : дис. канд. техн. наук / А. А. Корепанов ; СПбГТУ. – Санкт-Петербург, 1998. – 103 с.

20 Майоров, А. В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ / А. В. Майоров, А. А. Челазнов, М. В. Ильиных. – Москва : Вестник ИГЭУ, Вып. 6, 2015.

- 21 Рыжкова, Е. Н. О критериях выбора режима резистивного заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ / Е. Н. Рыжкова, М.А. Фомин, М.С. Жармагамбетова. – Москва : Журнал «Промышленная Энергетика», №11, 2013. – с. 23 – 30
- 22 Лисицин, Н. В. К обоснованию выбора режима заземления нейтрали / Н. В. Лисицин – Энергетик, № 1, 2000. – с. 22–24.
- 23 Половой, И. Ф. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения И. Ф. Половой, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – с.151
- 24 Зихерман, М. Х. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Технические требования и методы испытаний / М. Х. Зихерман. – Москва : Новости электротехники, №2 (68), 2011.
- 25 Поляков, В. С. Феррорезонанс в сетях с изолированной нейтралью / В. С. Поляков – Электрические станции, №3, 1977.
- 26 Бунин, В. Ш. Об опыте предупреждения повреждений трансформаторов напряжения и контроля изоляции в сетях 610 кВ / В. Ш. Бунин, В. Б. Дынкин, Е. А. Желтиков. – Электрические станции, №9, 1982. – с. 70 – 71
- 27 Феррорезонансные колебания в воздушных сетях 35 кВ и условия работы трансформаторов напряжения / Еолдобин, Д. А. [и др.] – Промышленная энергетика, № 10, 1991. – с. 24 – 27
- 28 Алексеев, В. Е. Феррорезонанс в сетях 6-10 кВ / В. Е. Алексеев, М. Х. Зихерман. – Электрические станции, № 1, 1979. – с. 63 – 65
- 29 Компенсация емкостных токов в сетях 6-10 кВ / В. И. Бойко [и др.] – Электрические станции, № 10, 1978. – с. 62 – 66
- 30 Лихачев, Ф. А. Повышение надежности распределительных сетей 6-10 кВ / Ф. А. Лихачев. – Электрические станции № 11, 1981. – с. 51 – 56
- 31 Алексеев, В. Г. Феррорезонанс в сетях 6 – 10 кВ / В. Г. Алексеев, М. Х. Зихерман. – Электрические станции, № 1, 1978, - с. 63 – 65
- 32 Поляков, В. С. Феррорезонанс в сетях с изолированной нейтралью / В. С. Поляков. – Электрические станции, №3, 1977.

33 Зихерман, М. Х. Повреждения трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / М. Х. Зихерман. – Электрические станции, № 11, 1978. – с. 65 – 67

34 Кадомская, К. П. Защита от перенапряжений в сетях различного назначения и защита от них / К. П. Кадомская. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 110 с.

35 Бохан, А. Н. Снижение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок – Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого – 2004.

36 Веприк, Ю. Н. Перенапряжения в электрических сетях 6-35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебеда, М. В. Петровский. – вестник СумДУ. Серия Технической науки, №4, 2008.

37 Ершов, А. М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Часть 1 Токи короткого замыкания : учебное пособие / А. М. Ершов. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2011.

38 Назаров, В. В. Защита электрических сетей от однофазных замыканий / В. В. Назаров. – К. : Лебедь, 1992. – 124 с.

39 Шабад, М. А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ России / М. А. Шабад. – Энергетик, № 3, 1999. – с. 11–13.

40 Васюра, Ю. Ф. Исследование коммутационных перенапряжений на электродвигателях собственных нужд электрических станций / Ю. Ф. Васюра. – Л. : ЛПИ, 1979. – 244 с.

41 Мусиенко А. Г. Пути повышения надежности работы городских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ / А. Г. Мусиенко, В. Ф. Сивокобыленко, М. П. Дергилев. – Электрические сети и системы, № 3, 2003 – с. 18 – 26

42 Герасимов, В. Г. Электротехнический справочник Том 3 изд. 9 Производство, передача и распределение электрической энергии / В. Г. Герасимов – 2010.

43 Сазыкин, В. Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах учебное пособие / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков. – Краснодар – 2017.

44 Валова, Т. О. Феррорезонансные перенапряжения. Общие сведения, условия возникновения способы ограничения / Т. О. Валова, А. Н. Козлов – Вестник АмГУ, №81, 2018. – с. 91 – 93

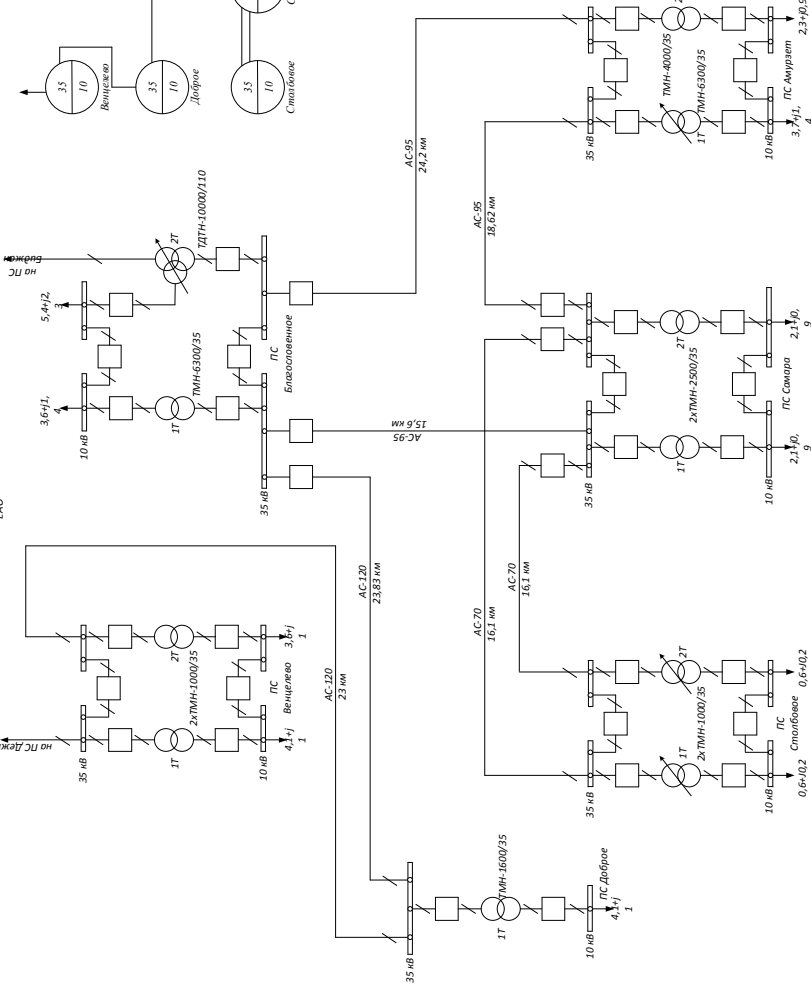
45 Евдокунин, Г. А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики) / Г. А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб. : Издательство Смирнова М. П., 2000. – 114 с.

46 Резисторы для заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ / С. Р. Бруй [и др.] – Новосибирск : ООО «ПНП Болид», 2013.

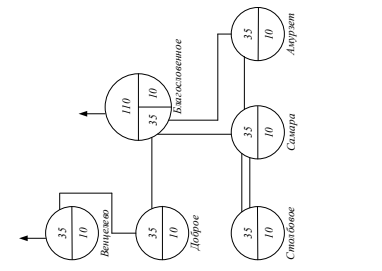
47 Серов, В. И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий / В. И. Серов, В. И. Шуцкий, Б. М. Ягудаев.– М. : Наука, 1985. – 135 с.

48 Титенков, С. С. Режимы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С. С. Титенков. – 2010.

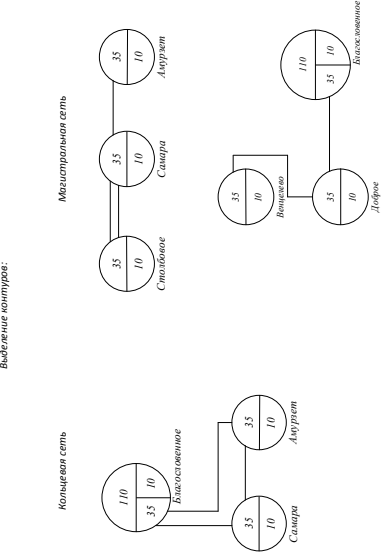
Однoliniейная схема участка электрической сети 35 кВ энергосистемы ЕАО



Иерархическая структура участка сети



Структурный анализ электроэнергетической сети. Выделение контуров:



Воздушные линии

Напряжение, кВ	Мера	Суммарная длина, км	Наименование линий
1	2	3	4
35	АС 200/9	46,83	Венцелово – Даброве, Даброве – Благовосенное
	АС 35/16	58,42	Благовосенное – Амурская, Благовосенное – Сивера, Сивера – Амурская
	АС 70/11	38,2	Сивера – Отаборское / цепь, Сивера – Отаборское II цепь

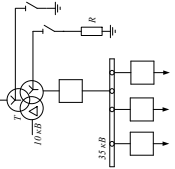
Подстанции

Наименование подстанции	Тип подстанции	Тип трансформатора	U, кВ	ВД, РУ
1	2	3	4	5
ПС Благовосенное	Узловая	ТДТН-10000/10	110	9
ПС Сивера	Узловая	ТМН-6300/35	35	9
ПС Амурская	Промышленная	2x ТМН-2800/35	35	9
ПС Даброве	Промышленная	ТМН-6300/35	35	5АН
ПС Венцелово	Промышленная	ТМН-4000/35	35	35
ПС Отаборское	Промышленная	ТМН-800/35	35	9
		ТМН-4000/35	35	9
		2x ТМН-6000/35	35	5АН

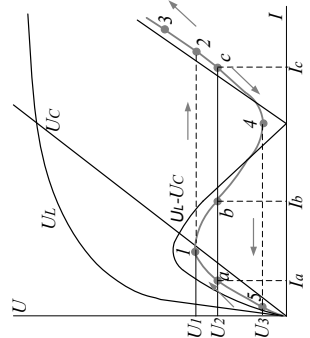
Основные характеристики проводов

Напряжение, кВ	Мера	R ₀ , Ом/км	X ₀ , Ом/км	B ₀ , мкСм/км	Q ₀ , МВар/км
1	2	3	4	5	6
35	АС 200/9	0,249	0,414	-	-
	АС 35/16	0,306	0,421	-	-
	АС 70/11	0,428	0,432	-	-

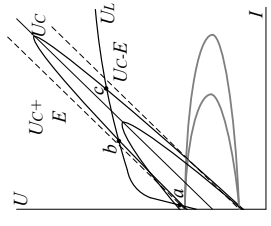
Схема включения заземляющего резистора



Графоаналитический метод определения напряжений



Определение напряжений с учетом активной составляющей



- a, b – E=U_L-U_C
- c – E=U_CU_L
- σ – U_L-U_C – индуктивный
- с – U_L-U_C – емкостный
- б – неуспокоенный режим

Напряжение, кВ	Характеристики векторного диаграммы	Количество резисторов	Мощность резистора, кВт	
1	2	3	4	5
35	2300 – 3400	3	180	178

ВЕР. 13.04.02.145 Сх	
Исполнитель	Масштаб
Проверенный	Листы
Утвержденный	Листы 1
Согласованный	Листы 2
Согласованный	Листы 3
Согласованный	Листы 4
Согласованный	Листы 5
Согласованный	Листы 6
Согласованный	Листы 7
Согласованный	Листы 8
Согласованный	Листы 9
Согласованный	Листы 10
Согласованный	Листы 11
Согласованный	Листы 12
Согласованный	Листы 13
Согласованный	Листы 14
Согласованный	Листы 15
Согласованный	Листы 16
Согласованный	Листы 17
Согласованный	Листы 18
Согласованный	Листы 19
Согласованный	Листы 20
Согласованный	Листы 21
Согласованный	Листы 22
Согласованный	Листы 23
Согласованный	Листы 24
Согласованный	Листы 25
Согласованный	Листы 26
Согласованный	Листы 27
Согласованный	Листы 28
Согласованный	Листы 29
Согласованный	Листы 30
Согласованный	Листы 31
Согласованный	Листы 32
Согласованный	Листы 33
Согласованный	Листы 34
Согласованный	Листы 35
Согласованный	Листы 36
Согласованный	Листы 37
Согласованный	Листы 38
Согласованный	Листы 39
Согласованный	Листы 40
Согласованный	Листы 41
Согласованный	Листы 42
Согласованный	Листы 43
Согласованный	Листы 44
Согласованный	Листы 45
Согласованный	Листы 46
Согласованный	Листы 47
Согласованный	Листы 48
Согласованный	Листы 49
Согласованный	Листы 50
Согласованный	Листы 51
Согласованный	Листы 52
Согласованный	Листы 53
Согласованный	Листы 54
Согласованный	Листы 55
Согласованный	Листы 56
Согласованный	Листы 57
Согласованный	Листы 58
Согласованный	Листы 59
Согласованный	Листы 60
Согласованный	Листы 61
Согласованный	Листы 62
Согласованный	Листы 63
Согласованный	Листы 64
Согласованный	Листы 65
Согласованный	Листы 66
Согласованный	Листы 67
Согласованный	Листы 68
Согласованный	Листы 69
Согласованный	Листы 70
Согласованный	Листы 71
Согласованный	Листы 72
Согласованный	Листы 73
Согласованный	Листы 74
Согласованный	Листы 75
Согласованный	Листы 76
Согласованный	Листы 77
Согласованный	Листы 78
Согласованный	Листы 79
Согласованный	Листы 80
Согласованный	Листы 81
Согласованный	Листы 82
Согласованный	Листы 83
Согласованный	Листы 84
Согласованный	Листы 85
Согласованный	Листы 86
Согласованный	Листы 87
Согласованный	Листы 88
Согласованный	Листы 89
Согласованный	Листы 90
Согласованный	Листы 91
Согласованный	Листы 92
Согласованный	Листы 93
Согласованный	Листы 94
Согласованный	Листы 95
Согласованный	Листы 96
Согласованный	Листы 97
Согласованный	Листы 98
Согласованный	Листы 99
Согласованный	Листы 100

