

**Методические указания по предотвращению феррорезонанса
в распределительных устройствах 6 кВ и выше**



Ключевые слова: подстанция, трансформатор напряжения, надежность, качество электрической энергии, перенапряжения, реактор, заземление

- 1 РАЗРАБОТАН РУП «Белэнергосетьпроект»
- 2 УТВЕРЖДЕН приказом государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго» _____ № _____ и ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ _____ № _____
- 3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Настоящий стандарт организации не может быть тиражирован и распространен без разрешения ГПО «Белэнерго»

Издан на русском языке

Содержание

1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	1
3 Термины и определения, обозначения и сокращения.....	2
3.1 Термины и определения	2
3.2 Обозначения и сокращения.....	6
4 Защита от феррорезонансных повышений напряжения электроустановок напряжением 6-35 кВ.....	7
4.1 Общие положения	7
4.2 Феррорезонанс в сетях 6-35 кВ с электромагнитными ТН.....	9
4.2.1 Явление самопроизвольного смещения нейтрали.....	9
4.2.2 Субгармонический феррорезонанс ТН с относительно небольшими емкостями коротких линий 6-35 кВ	10
4.2.3 Феррорезонансные колебания в сетях 6-35 кВ с электромагнитными ТН при ОЗЗ через перемежающуюся дугу	10
4.3 Феррорезонанс в несимметричной схеме сети	11
4.4 Мероприятия по защите от феррорезонансных повреждений ТН в сетях 6- 35 кВ, работающих с изолированной нейтралью.....	12
5 Защита от резонансных повышений напряжения электроустановок напряжением 110-750 кВ	13
5.1 Общие положения	13
5.2 Защита от феррорезонансных перенапряжений при неполнофазных режимах ВЛ 110 кВ с подключенными без выключателей силовыми трансформаторами с изолированной нейтралью	14
5.3 Защита от резонансных повышений напряжений на отключенной в цикле ОАПВ ВЛ с ШР	17
5.4 Рекомендации по защите от резонансных повышений напряжений в неполнофазных режимах ВЛ напряжением 330-750 кВ	18
5.5 Рекомендации по защите от феррорезонансных повышений напряжения ВЛ 330-750 кВ с ШР при наличии параллельной ВЛ.....	19
5.6 Рекомендации по защите от феррорезонансных повышений напряжения в РУ напряжением 330 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения 19	19
5.7 Рекомендации по защите от резонансных повышений напряжений РУ с комплектным элегазовым оборудованием.....	21
5.8 Защита от резонансных повышений напряжений на второй гармонике в электропередачах 330-750 кВ с ШР	22
5.9 Рекомендации по защите от феррорезонанса в емкостных трансформаторах напряжения.....	23
Приложение А (справочное) Экспериментальные исследования, методы испытаний и практические измерения. Компьютерное моделирование феррорезонансных колебаний	25

Приложение Б (справочное) Устройства для подавления (затухания) феррорезонансных колебаний	35
Приложение В (справочное) Схемы и основные принципы конструктивных решений антирезонансных ТН 6-35 кВ	37
Приложение Г (справочное) Методика исследования резонансных повышений напряжений на отключенной в цикле ОАПВ ВЛ с ШР	43
Приложение Д (справочное) Основные параметры схемы замещения ТН типов НКФ-220 и НКФ-500	46
Приложение Е (справочное) Емкости конденсаторов, шунтирующих контакты выключателей	47
Библиография	48

СТАНДАРТ ГПО «БЕЛЭНЕРГО»**Методические указания по предотвращению феррорезонанса
в распределительных устройствах 6 кВ и выше**

Дата введения _____

1 Область применения

Настоящий стандарт организации ГПО «Белэнерго» (далее – стандарт) устанавливает основные технические и методические положения по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 6 кВ и выше.

Требования стандарта распространяются на вновь сооружаемые и реконструируемые объекты подстанций напряжением 6 кВ и выше.

Стандарт предназначен для применения структурными организациями ГПО «Белэнерго» при проектировании, строительстве и эксплуатации подстанций 6 кВ и выше.

Другими ведомствами и организациями Республики Беларусь стандарт может быть использован по согласованию с ГПО «Белэнерго».

2 Нормативные ссылки

В настоящем СТП использованы ссылки на следующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА):

ТКП 181-2009 (02230) Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей

ТКП 339-2011 (02230) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний

ТКП 427-2012 (02230) Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок.

ГОСТ 687-78 Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия.

ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.

ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

ГОСТ 1983-01 Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.

ГОСТ 2213-79 Предохранители переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие технические условия

ГОСТ 14209-85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки

ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения

ГОСТ 19431-84 Энергетика и электрификация. Термины и определения.

ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93) Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения

ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ IEC 61869-3—2012 Трансформаторы измерительные. Часть 3 Дополнительные требования к индуктивным трансформаторам напряжения

СТП 09110.20.187-09 Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор

СТП 33240.20.501-19 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей

СТП 33243.01.216-16 Подстанции электрические напряжением 35 кВ и выше. Нормы технологического проектирования

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие включенных в перечень ТНПА.

Если ссылочные ТНПА заменены (изменены), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененными (измененными) ТНПА. Если ссылочные ТНПА отменены без замены, то положение, в котором дана ссылка на них, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения, обозначения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применяют термины, установленные в ТКП 181, ТКП 339, ТКП 427, СТБ 2574, СТБ 1154, ГОСТ 12.0.002, ГОСТ 13276, ГОСТ 14254, ГОСТ 16110, ГОСТ 17613, ГОСТ 30331.1, ГОСТ 31946, ГОСТ 30830, ГОСТ 32144, ГОСТ 52725, ГОСТ IEC 61439-1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 заземление: Преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством.

3.1.2 изолированная нейтраль: Нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление.

3.1.3 импульс: Униполярная волна напряжения или тока, возрастающая без заметных колебаний с большой скоростью до максимального значения и уменьшающаяся, обычно с меньшей скоростью, до нуля с небольшими,

если это будет иметь место, переходами в противоположную полярность.

Примечание – Параметрами, определяющими импульсы напряжения или тока, являются полярность, максимальное значение (амплитуда), условная длительность фронта и условная длительность импульса

3.1.4 импульсное сопротивление заземлителя: Отношение амплитуды напряжения на заземлителе (в месте ввода тока) к амплитуде импульса тока.

3.1.5 квазистационарные (временные) перенапряжения: Перенапряжения промышленной или близкой к ней частоты, а также перенапряжения на высших и низших гармониках, не затухающие или слабо затухающие, возникающие как следствие изменения схемы сети.

3.1.6 коммутационные перенапряжения: Перенапряжения, существующие во время переходных процессов при коммутациях элементов сети, сопровождающих внезапное изменение схемы или режима.

3.1.7 коэффициент замыкания на землю в трехфазной электрической сети: Отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания.

3.1.8 модернизация действующей электроустановки (модернизация): Изменение конструкции электроустановки, линии электропередачи, обеспечивающее улучшение их показателей назначения, повышение надежности, снижение энергетических, материальных и трудовых затрат и трудовых ресурсов при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте, а также с целью возможности применения при эксплуатации более дешевых видов топлива, сырья, материалов.

3.1.9 наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН; $U_{нр}$: Наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено непрерывно к ОПН в течение всего срока его службы, и которое не приводит к повреждению или термической неустойчивости ОПН.

3.1.10 номинальные данные трансформатора: Указанные изготовителем параметры трансформатора (например, частота, мощность, напряжение, ток) обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативным документом и являющиеся основой для определения условий изготовления, испытаний, эксплуатации (ГОСТ 16110).

3.1.11 ограничитель перенапряжений нелинейный; ОПН: Аппарат, предназначенный для защиты изоляции электрооборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений, представляющий собой последовательно и (или) параллельно соединенные металлооксидные варисторы без каких-либо последовательных или параллельных искровых промежутков, заключенные в изоляционный корпус (ГОСТ 52725).

3.1.12 перенапряжение: Превышение напряжения над наибольшим рабочим напряжением, установленным для данного электрооборудования.

3.1.13 перенапряжения переходного феррорезонанса: Перенапряжения, возникающие при коммутации возбужденного трансформатора и ли-

нии на частоте близкой к собственной частоте схемы сети.

Примечание – Время существования этого режима определяется временем установления режима в магнитной цепи трансформатора.

3.1.14 предвключенный реактанс системы: Сопротивление системы в схеме замещения источника питания, определяемое параметрами питающей сети.

Примечание – Реактанс системы, определяется по токам однофазного и трехфазного КЗ при отключенной коммутируемой линии.

3.1.15 предохранитель: Коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение, с последующим гашением возникающей электрической дуги (ГОСТ 2213).

3.1.16 распределительное устройство: Электроустановка, служащая для приема и распределения электроэнергии одного класса напряжения и содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства (компрессорные, аккумуляторные и др.), а также устройства защиты, автоматики, телемеханики, связи и измерений.

3.1.17 распределительное устройство открытое: Распределительное устройство, где все или основное оборудование расположено на открытом воздухе.

3.1.18 распределительное устройство закрытое: Распределительное устройство, оборудование которого расположено в здании.

3.1.19 распределительная электрическая сеть; РС: Совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии между пользователями электрической сети, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории (ГОСТ 32144).

3.1.20 реконструкция действующей электроустановки (реконструкция): Комплекс технических операций и организационных действий для улучшения функционирования электроустановки, линии электропередачи или для использования их по новому назначению путем значительных изменений, затрагивающих принципиальную сущность конструкции, компоновки и технологической схемы.

3.1.21 резонанс: Явление в электрической цепи, содержащей участки, имеющие индуктивный и емкостной характер, при котором разность фаз синусоидального электрического напряжения и синусоидального электрического тока на входе цепи равна нулю.

3.1.22 резонансные (феррорезонансные) повышения напряжения: Повышения напряжения, вызванные резонансными колебаниями в цепи с линейными (нелинейными) элементами.

3.1.23 система защиты от перенапряжения: Совокупность мероприятий и технических средств (устройства заземления, защитные аппараты), снижающих негативное воздействие перенапряжений на электроустановки [4].

3.1.24 ток пропускной способности ОПН; $I_{пр}$: Нормируемое изготовителем максимальное значение прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс (ток пропускной способности).

Примечание – ОПН должен выдержать 18 таких воздействий с принятой последовательностью их приложения без потери рабочих качеств.

3.1.25 трансформатор напряжения антирезонансный: Трансформатор, устойчиво работающий при наличии в сети феррорезонансных явлений.

3.1.26 трансформаторная подстанция: Подстанция, предназначенная для преобразования электрической энергии одного напряжения в энергию другого напряжения с помощью трансформаторов [5].

3.1.27 трансформатор силовой: Статическое устройство, имеющее две или более обмотки, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного напряжения и тока в одну или несколько других систем переменного напряжения и тока, имеющих обычно другие значения при той же частоте, с целью передачи мощности (ГОСТ 30830).

3.1.28 установившийся режим электрической цепи: Режим электрической цепи, при котором электродвижущие силы, электрические напряжения и электрические токи в электрической цепи являются постоянными или периодическими.

3.1.29 устройства защиты от перенапряжений: Устройства (разрядники молниезащитные, ОПН или УЗПН), предназначенные для предотвращения импульсного перекрытия линейной изоляции и перехода разряда по устройству в силовую дугу тока промышленной частоты [5].

3.1.30 устройство электротехническое: Совокупность взаимосвязанных электротехнических изделий, находящихся в конструктивном и (или) функциональном единстве, предназначенная для выполнения определенной функции по производству или преобразованию, передаче, распределению или потреблению электрической энергии (ТКП 181).

3.1.31 электрическое оборудование (электрооборудование): Любое оборудование, предназначенное для производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии, например: трансформаторы, генераторы, аппараты, измерительные приборы, устройства защиты, кабельная продукция, электроприемники (ТКП 181).

Примечание – Электрооборудование электроустановки – это электрооборудование, относящееся к электроустановке.

3.1.32 электрическая сеть с эффективно заземленной нейтралью: Трехфазная электрическая сеть напряжением выше 1 кВ, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4.

3.1.33 электроустановка: Совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены, предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другие виды энергии (СТБ 2574).

3.2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применяют следующие сокращения:

- АПВ** - автоматическое повторное включение;
- АТ** - автотрансформатор;
- ВЛ** – воздушная линия электропередачи;
- ВН** - высокое напряжение;
- ДГР** - дугогасящий реактор;
- ДЗШ** - дифференциальная защита шин;
- ЗРУ** - закрытое распределительное устройство;
- ЗУ** – заземляющее устройство;
- КЗ** – короткое замыкание;
- КЛ** – кабельная линия электропередачи;
- КР** - компенсационный реактор;
- КРУ** - комплектное распределительное устройство;
- КРУЭ** - комплектное распределительное устройство элегазовое;
- НД** - нормативный документ;
- НН** - низкое напряжение;
- НТД** – нормативно-техническая документация;
- ОАПВ** - однофазное автоматическое повторное включение;
- ОЗЗ** - однофазное замыкание в электрической цепи на землю;
- ОПН** - ограничитель перенапряжения нелинейный;
- ОРУ** - открытое распределительное устройство;
- ПС** - подстанция;
- РЗ** - релейная защита;
- РУ** - распределительное устройство;
- ТКП** – технический кодекс установившейся практики;
- ТМГ** – трансформатор масляный герметичный;
- ТН** - трансформатор напряжения;
- ТТ** - трансформатор тока;
- ТУ** – технические условия;
- УРОВ** - устройство резервирования отказа выключателей;
- УШР** — управляемый шунтирующий реактор;
- ФРП** – феррорезонансные перенапряжения;
- ШР** — шунтирующий реактор;
- ЭО** – электрическое оборудование;
- ЭСО** – энергоснабжающая организация

4 Защита от феррорезонансных повышений напряжения электроустановок напряжением 6-35 кВ

4.1 Общие положения

4.1.1 Сети номинального напряжения 6-35 кВ работают с изолированной нейтралью, с компенсацией емкостного тока замыкания на землю (резонансное заземление нейтрали) [1] или с нейтралью заземленной через резистор, в соответствии с требованиями СТП 09110.20.187.

Для компенсации емкостных токов замыкания на землю в сетях применяются заземляющие дугогасящие реакторы (ДГР) с ручным или автоматическим регулированием индуктивного сопротивления. Рекомендуются реакторы плунжерного типа с плавным регулированием индуктивности, в соответствии с рекомендациями СТП 33243.01.216.

Компенсация емкостного тока замыкания на землю дугогасящими реакторами должна применяться при емкостных токах, превышающих значения, приведенные в Таблице 4.1 [1].

Таблица 4.1

Номинальное напряжение сети, кВ	6	10	20	35
Емкостный ток замыкания на землю, А, в сети с ВЛ на ж/б и (или) металлических опорах	10	10	10	10
Емкостный ток замыкания на землю, А, в сети с ВЛ без ж/б и (или) металлических опор	30	20	15	10

Работа сетей 6-35 кВ без компенсации емкостного тока при его значениях, превышающих значения, приведенные выше, не допускается.

Мощность дугогасящих реакторов выбирается по емкостному току сети и должна иметь резонансную настройку. Работа сетей с недокомпенсацией емкостного тока, не допускается.

4.1.2 Условия возникновения феррорезонанса [2,3]

4.1.2.1 Первое условие.

Феррорезонансные процессы в сети 6-35 кВ могут происходить, если емкостное сопротивление сети ($X_c = U_\phi / I_c$) находится в пределах, определяемых пределами изменения индуктивного сопротивления трансформатора напряжения

$$X_{xx} \geq X_c \geq X_s, \quad (1)$$

где, $X_{xx} = \omega L_{xx}$, L_{xx} -индуктивность холостого хода xx , Гн;

$X_s = \omega L_s - L_s$ -индуктивность насыщения, Гн; ω - угловая частота напряжения сети, 1/с;

U_ϕ – фазное напряжение сети, В; I_c – емкостный ток сети, А.

Методика расчета индуктивности холостого хода X_{xx} и индуктивности насыщения X_s трансформатора напряжения приведена в приложении А.

4.1.2.2 Второе условие.

Для возбуждения ФРП в контуре (емкость сети параллельно индуктивности ТН) с параметрами, отвечающими условию 4.1.2.1 необходимо собы-

тие, приводящее к изменению индуктивности ТН. Таким событием в сети с изолированной нейтралью является, например, отключение дугового металлического замыкания на землю, при котором напряжение на ТН скачком изменяется от U_{ϕ} до $U_{л}$. ФРП возбудится в контуре с резонансными параметрами после скачка напряжения в том случае, если суммарный поток в магнитопроводе ТН окажется больше потока начального насыщения магнитопровода ($\Psi_{\text{нач.нас}}$), $\Psi_{\text{ост}} + \Psi_{\text{уст}} \geq \Psi_{\text{нач.нас}}$. При скачкообразном изменении напряжения на ТН в его магнитопроводе сохраняется остаточный поток, соответствующий величине напряжения до скачка ($\Psi_{\text{ост}}$), на который накладывается переменный поток от напряжения, установившегося после скачка ($\Psi_{\text{уст}}$).

4.1.2.3 Третье условие.

Величина энергии, поступающей в феррорезонансный контур при каждом изменении параметра (индуктивности ТН), должна быть больше величины потерь в нем.

ФРП относится к параметрическим процессам, так как возникает, когда создаются условия (первое и второе) для изменения одного из параметров контура – индуктивности ТН, которая изменяется скачкообразно от индуктивности холостого хода $L_{\text{хх}}$ до индуктивности насыщения $L_{\text{с}}$.

Когда активное сопротивление потерь в контуре RLC достигает значения $R = 2\sqrt{L/C}$ собственная частота обращается в нуль, колебания прекращаются и свободный ток убывает по апериодическому закону, и в этом случае возникновение резонансных колебаний невозможно. Внесение в контур затухания активного сопротивления, эквивалентного затуханию, вносимому критическим сопротивлением, предотвращает возбуждение ФРП.

4.1.3 Феррорезонанс ТН с емкостью сети возможен в схемах, работающих с изолированной нейтралью в следующих случаях:

- при самопроизвольном смещении нейтрали в схемах с малыми емкостными токами;
- при субгармоническом феррорезонансе в схемах с относительно небольшими емкостями коротких линий 6-35 кВ;
- при однофазных замыканиях на землю через перемежающуюся дугу.

При наличии ДГР и (или) резисторного заземления нейтрали феррорезонанс невозможен.

В зависимости от параметров схемы можно выделить 4 различных режима феррорезонанса:

1. нестационарные затухающие феррорезонансные колебания;
2. установившиеся феррорезонансные колебания на частоте сети;
3. установившиеся субгармонические феррорезонансные колебания;
4. стационарные хаотические феррорезонансные колебания.

Все режимы стационарного феррорезонанса (2,3,4) приводят к большому току в первичной обмотке индуктивного трансформатора напряжения и, следовательно, к перегреву. Любая операция переключения неизбежно приводит к процессу компенсации из-за состояния сети после переключения выключателя. В случае установившихся феррорезонансных колебаний по-

терь в цепи недостаточно для гашения колебаний. В этом феррорезонансном режиме колебания могут привести к высоким перенапряжениям на частоте сети, в зависимости от значений емкостей цепи. Эти перенапряжения могут привести к выходу из строя распределительного устройства. В качестве альтернативы большой ток в первичной обмотке индуктивного трансформатора напряжения приводит к перегреву. В редких случаях также могут возникать хаотические формы колебаний без определенной частоты. В этом случае результирующие напряжения снова могут оказаться намного выше, чем для субгармонической формы волны, а большой ток через первичную обмотку может привести к перегреву.

4.1.4 Феррорезонанс емкости сети с потребительским трансформатором возможен в сетях 6-35 кВ при неполнофазных схемах.

4.2 Феррорезонанс в сетях 6-35 кВ с электромагнитными ТН

4.2.1 Явление самопроизвольного смещения нейтрали

4.2.1.1 Феррорезонанс ТН с емкостью ненагруженных шин на частоте 50 Гц, носит название "*самопроизвольного смещения нейтрали*". Такой резонанс возникает в результате одновременности включения фаз выключателя при коммутациях элементов сети.

При одновременности включения фаз выключателя на емкостях сети появляются так называемые "нескомпенсированные" заряды, которые создают постоянную составляющую напряжения U_0 на фазах сети, одинаковую для всех трех фаз. Постоянная составляющая напряжения на емкости сети и индуктивности ТН приводит к росту магнитного потока в магнитопроводах фаз ТН. Через какое-то время, зависящее от величины U_0 и мгновенных значений магнитных потоков в фазах ТН в момент образования U_0 , произойдет насыщение магнитопровода одной из фаз ТН, через которую будут перезаряжаться емкости трех фаз сети.

Помимо малой ёмкости фазы на землю, для возникновения явления «самопроизвольного смещения нейтрали» необходимо ещё одно обязательное условие – несимметрия. В идеально симметричной схеме даже при полной компенсации тока намагничивания ТН ёмкостным током фазы не произойдёт искажения напряжений. Несимметрией может быть, например, некоторое отличие величин ёмкостей фаз на землю, или различие кривых намагничивания магнитопроводов разных фаз ТН.

Разновременность в действии фаз выключателей при коммутациях в сети с изолированной нейтралью приводит к несимметрии напряжений на фазах, которая проявляется в повышении напряжения на одной фазе и снижению его на двух других и к появлению напряжения на нейтрали сети. Появляется напряжение нулевой последовательности, которое обычно составляет 20÷60% от номинального напряжения.

Возможны три варианта развития процесса:

– затухание нелинейных колебаний и возвращение сети в нормальный режим работы с синусоидальными токами и напряжениями;

- бесконечное (теоретически) продолжение нелинейных колебаний в виде периодических процессов на частоте 50 Гц;
- бесконечное продолжение нелинейных колебаний в хаотической непериодической форме.

4.2.1.2 Указанный феррорезонанс не сопровождается большими перенапряжениями на фазах сети и не приводит к повреждениям ТН. На практике данное явление называют *"ложной землей"*, поскольку оно может при каждом отключении-включении секции шин переходить с одной фазы на другую или вообще не появляться.

4.2.1.3 Феррорезонанс *"ложная земля"* не возникает при применении, например, антирезонансного ТН типа НАМИ.

4.2.1.4 Для предотвращения самопроизвольных смещений нейтрали и повреждений ТН в электроустановках напряжением 6-35 кВ возможна установка резисторов мощностью 400 Вт сопротивлением 25 Ом в разомкнутый треугольник дополнительных обмоток каждого ТН 6-35 кВ с заземленной нейтралью обмотки ВН. В большинстве случаев, этой мощности бывает достаточно для срыва феррорезонанса этого типа. Необходимость и достаточность установки резистора во вторичную обмотку ТН следует определять при проектировании сети.

4.2.2 Субгармонический феррорезонанс ТН с относительно небольшими емкостями коротких линий 6-35 кВ

4.2.2.1 В сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью возможен феррорезонанс на субгармониках 1/2; 1/3; 1/5 и т.д. В этих случаях ТН резонируют с относительно небольшими емкостями коротких линий.

Потокоцепление отдельных фаз ТН вырастает при этом более чем в 2 раза, сталь магнитопровода глубоко насыщается, и намагничивающий ток превышает предельно допустимое значение, что приводит к перегреву обмоток и разрушению ТН.

4.2.2.2 Субгармоническое напряжение появляется в нулевой последовательности и искажает только фазные напряжения. Напряжения на фазах сети не превышают наибольшего рабочего напряжения и потому не представляют опасности для электрооборудования кроме ТН.

4.2.2.3 Установка антирезонансных ТН позволяет избежать повреждения ТН, если они либо сами не вызывают субгармонического феррорезонанса, либо способны длительно выдерживать субгармонический феррорезонанс, вызванный другими ТН.

4.2.3 Феррорезонансные колебания в сетях 6-35 кВ с электромагнитными ТН при ОЗЗ через перемежающуюся дугу

4.2.3.1 Сети с изолированной нейтралью допускают в соответствии с ТКП 181 и СТП 33240.20.501 длительную работу с ОЗЗ. Емкостная дуга при ОЗЗ может иметь перемежающийся характер, то есть, сопровождается многочисленными гашениями и зажиганиями.

Перемежающаяся дуга создает постоянную составляющую в напряже-

ниях 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. Чем чаще зажигается и прерывается дуга, тем больше действующее значение тока через ТН, тем быстрее произойдет его тепловое разрушение.

4.2.3.2 Наиболее эффективным мероприятием по повышению надежности работы ТН и ликвидации их повреждений является применение антирезонансных ТН.

Включение резистора мощностью 400 Вт сопротивлением порядка 25 Ом в разомкнутый треугольник ТН слабо влияет на ход процесса дугового замыкания в сети.

4.2.3.3 Напряжение на здоровых фазах не превышает линейного напряжения, которое в соответствии с ГОСТ 721 для сетей 6-35 кВ является наибольшим рабочим напряжением и потому не представляет опасности для изоляции электрооборудования.

Следует учитывать, что при ОЗЗ у ТН нарушается нормированный класс точности, который определяется в нормальном симметричном режиме работы.

4.3 Феррорезонанс в несимметричной схеме сети

4.3.1 Феррорезонансные перенапряжения возможны в сетях 6-35 кВ при неполнофазных коммутациях выключателей, перегорании плавких вставок предохранителей или обрывах проводов ВЛ.

Феррорезонансный контур образует индуктивность намагничивания слабонагруженного потребительского трансформатора с емкостным сопротивлением элементов сети, при этом наличие или отсутствие компенсации не влияет на вероятность возникновения и уровень перенапряжений.

4.3.2 Феррорезонансные перенапряжения могут возникнуть как во всей сети, так и на отдельных ее элементах. Величина перенапряжений зависит от параметров потребительского трансформатора (мощности, тока холостого хода и индуктивности намагничивания), емкости сети и может достигать высоких величин, превышающих уровень изоляции электрооборудования.

4.3.3 Перенапряжения в неполнофазных схемах опасны не только величиной. Неполнофазный режим приводит к феррорезонансному преобразованию однофазного напряжения в трехфазное, что может привести к так называемому опрокидыванию фаз, то есть, изменению порядка чередования фаз у потребительского трансформатора. Если потребительский трансформатор имеет небольшую двигательную нагрузку, то может наблюдаться изменение направления вращения двигателей.

4.3.4 Большинство потребительских трансформаторов 10/0,4 кВ имеют трехстержневой магнитопровод и подключаются к ВЛ через предохранители с плавкими вставками. При замыкании на землю одного из трех высоковольтных вводов трансформатора плавкая вставка предохранителя этой фазы обычно перегорает. Создается неполнофазная схема. Плавкие вставки предо-

хранителей двух других фаз остаются целыми, сохраняя связь точки заземления с остальной сетью через слабонагруженный трансформатор.

Такая схема подвержена феррорезонансу емкости сети с фазными индуктивностями первичной обмотки потребительского трансформатора. Благодаря феррорезонансу образуется новая трехфазная система междуфазных напряжений, способная иметь либо прямое, либо обратное чередование фаз.

При обратном чередовании фаз напряжение на оборванной фазе сети повышается до $3,8 \div 4,2 U_{\phi}$, напряжение $3U_0$ на дополнительной обмотке ТН превышает 200 В, а вращение двигателей на стороне 0,4 кВ этого трансформатора меняется на обратное. Указанный процесс может существовать длительно.

При прямом чередовании фаз, во вновь образованной трехфазной системе, фазные напряжения в сети на необорванных фазах повышаются до $2,2 \div 2,3 U_{\phi}$ и может вызвать перегорание предохранителей ТН, которые, как правило, могут выдерживать данный режим в течение нескольких часов. Напряжение оборванной фазы сети относительно земли понижается примерно до $0,3 U_{\phi}$, а напряжение $3U_0$ дополнительной обмотке ТН повышается до 120 В.

4.3.5 При неполнофазных режимах возможны повреждения трансформаторов напряжения и ОПН. Повреждение ТН приводит к выходу из работы устройств релейной защиты.

Для снижения повреждаемости ТН следует применять антирезонансные конструкции трансформаторов напряжения, которые при любом виде феррорезонанса выдерживают длительные повышения напряжения на одной из фаз до $3,0 U_{н.раб.}$

4.3.6 Для исключения возникновения неполнофазной схемы при коммутациях ВЛ запрещаются пофазные включения и отключения воздушных и кабельных линий, которые могут приводить к напряжению смещения нейтрали. Следует также по возможности избегать подключения потребительских трансформаторов через плавкие предохранители.

4.4 Мероприятия по защите от феррорезонансных повреждений ТН в сетях 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью

4.4.1 Для исключения повреждений ТН 6-35 кВ, работающих в сетях с изолированной нейтралью рекомендуется применение антирезонансных ТН.

4.4.2 К антирезонансным ТН предъявляются следующие требования:

- не вызывать самим устойчивого феррорезонанса
- не повреждаться при длительных однофазных замыканиях сети на землю через перемежающуюся дугу;
- не допускать смещения нейтрали при коммутации ненагруженных шин, что подтверждается тем, что при коммутациях установившееся значение напряжения на выводах разомкнутого треугольника дополнительной вторичной обмотки не превышает 7 В;

– не повреждаться при скачкообразном изменении тока, сопровождающемся изменением фазы тока по отношению к напряжению на 180° (опрокидывание фазы).

– не повреждаться при устойчивом феррорезонансе емкости сети с нелинейной индуктивностью других трансформаторов (силовых или измерительных).

4.4.3 Антирезонансные свойства у ТН 6-35 кВ обеспечиваются следующими способами:

– добавлением в схему активных гасительных (демпфирующих) сопротивлений (приложение Б);

– повышением потокосцепления насыщения путем снижения номинальной индукции;

– изменением схемы соединения обмоток трехфазных ТН и т.д.

4.4.4 Схемы и основные принципы конструктивных решений антирезонансных ТН 6-35 кВ приведены в приложении В.

4.4.5 Каждый производитель антирезонансного ТН должен определить для своего типа ТН степень его устойчивости к каждому виду возможного феррорезонанса и представить потребителю протоколы испытаний в соответствии с требованиями п.4.4.2. Результаты испытаний могут быть приведены в паспорте ТН (Руководстве по эксплуатации).

4.4.6 Феррорезонанс ТН не возможен при заземлении нейтрали сети через ДГР. Ликвидации феррорезонанса можно достичь заземлением нейтрали сети через высокоомный резистор. Величина резистора определяется по выражению

$$R \leq 2X_c, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где, R – величина резистора включенного в нейтраль сети 6-35 кВ, Ом;

X_c – емкостное сопротивление сети, Ом.

4.4.7 Параметры постоянно включенного высокоомного резистора в нейтрали сети должны соответствовать параметрам сети при длительном режиме включения. При недостаточной тепловой мощности резистора максимально допустимое время работы сети с однофазным замыканием на землю следует ограничивать.

4.4.8 Необходимо учитывать, что антирезонансные ТН в сетях 6-35 кВ при параллельной эксплуатации с ТН традиционного исполнения (НТМИ, ЗНОМ, ЗНОЛ) не обеспечивают им антирезонансных свойств.

5 Защита от резонансных повышений напряжения электроустановок напряжением 110-750 кВ

5.1 Общие положения

5.1.1 Электроустановки 110-750 кВ работают с заземленной и эффективно заземленной нейтралью. Резонансные повышения напряжения возможны в этих электроустановках в следующих случаях:

– при неполнофазных включениях или отключениях ВЛ 110 кВ или обрыве проводов ВЛ, к которой подключены без выключателей один или несколько слабо нагруженных трансформаторов с разземленной нейтралью и имеющих обмотку замкнутую в треугольник. Неполнофазные коммутации возникают при неправильной работе линейных выключателей;

– при неполнофазных включениях ВЛ 330-750 кВ с ШР и компенсацией реактивной мощности близкой к 100%;

– на отключенной фазе в цикле ОАПВ ВЛ с ШР после погасания тока подпитки и компенсацией реактивной мощности близкой к 100%;

– при отключении системы шин, ошиновок ВЛ, АТ ОРУ и КРУЭ 220-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения выключателями, дугогасительные камеры которых имеют несколько разрывов шунтированных емкостными делителями (градуировочными конденсаторами);

– на отключенной тремя фазами ВЛ с ШР после погасания тока подпитки по причине наличия взаимоиндукции с другими ВЛ находящимися в работе;

– при включении ВЛ 330-750 кВ с ШР в схемах, где первая собственная частота схемы близка к 2ω , возможны резонансные повышения напряжения на второй гармонике напряжения.

– при электромагнитном влиянии на отключенную цепь двухцепной ВЛ второй цепи ВЛ более высокого напряжения. В этом случае отдельные фазы подверженной влиянию ВЛ будут колебаться независимо друг от друга.

Феррорезонансные повышения напряжения могут достигать величин, превышающих уровень изоляции электрооборудования, что приводит к повреждению последнего. Поэтому необходимы мероприятия, исключающие резонансные повышения напряжения или снижения их до допустимых величин.

5.1.2 Антирезонансные свойства трансформаторов напряжения номинальным напряжением 110 кВ и выше рекомендуется подтверждать испытаниями [16]:

– при отключении выключателей, содержащих емкостные делители (градуировочные конденсаторы), шунтирующие дугогасительные устройства;

– при неполнофазных режимах работы сети;

– при работе на ненагруженных шинах.

5.2 Защита от феррорезонансных перенапряжений при неполнофазных режимах ВЛ 110 кВ с подключенными без выключателей силовыми трансформаторами с изолированной нейтралью

5.2.1 В сетях 110 кВ силовые трансформаторы могут работать, как с заземленной, так и с разземленной нейтралью обмоток высшего напряжения.

При неполнофазных режимах работы сети 110 кВ возможно выделение участков, в которых нет ни одного силового трансформатора с заземленной нейтралью (потеря нейтрали на участке сети). В этих случаях, при неполнофазных включениях ВЛ 110 кВ с одним или несколькими слабо нагруженными или холостыми трансформаторами (трансформаторами на холостом ходу) с разземленной нейтралью, а также при обрыве провода ВЛ могут возникать феррорезонансные перенапряжения в переходном и установившемся режимах. Перенапряжения в этих режимах могут превышать уровень изоляции электрооборудования и приводить к его повреждению, особенно, если напряжение в сети соответствовало наибольшему рабочему напряжению по ГОСТ 721.

В случае выделения участка сети 110 кВ, где имеется хотя бы один силовой трансформатор с заземленной нейтралью, феррорезонансные перенапряжения не возникают.

5.2.2 Феррорезонансные повышения напряжения возможны на отключенных фазах ВЛ в схемах с односторонним питанием ВЛ, к которой подключены один или несколько слабо нагруженных трансформаторов с разземленной нейтралью, имеющие обмотку НН соединенную в треугольник.

5.2.3 Схемы, в которых возможны феррорезонансные перенапряжения, при неполнофазной работе выключателей приведены на рисунках 5.1 и 5.2.

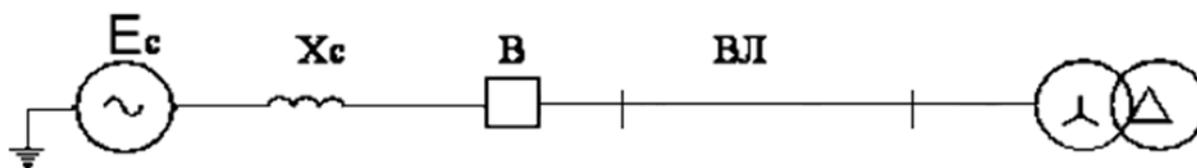


Рисунок 5.1 – Однолинейная схема включения ВЛ с подключенным к ней трансформатором на конце, имеющим схему соединения обмоток звезда-треугольник.

Нейтраль обмотки ВН изолирована:

E_c - ЭДС системы; X_c - предвключенный реактанс системы; B - выключатель

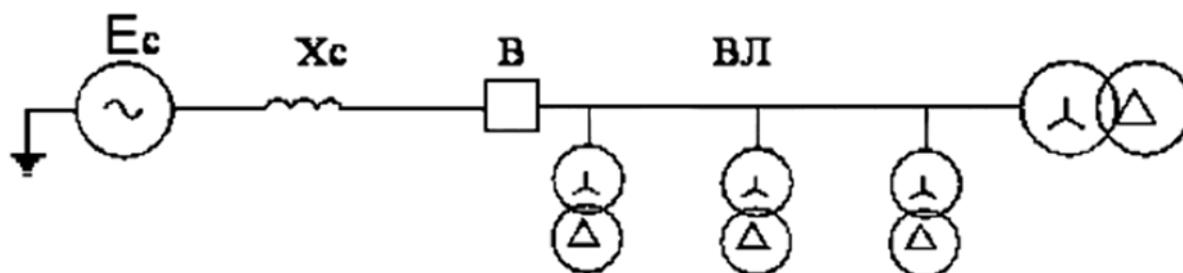


Рисунок 5.2 – Однолинейная схема включения ВЛ с подключенными к ней трансформаторами, имеющими схему соединения обмоток звезда-треугольник. Нейтраль обмоток ВН изолирована:

E_c - ЭДС системы; X_c - предвключенный реактанс системы; B – выключатель

5.2.4 Феррорезонансные перенапряжения при обрыве провода возможны только в случае, когда ни один из концов оборвавшегося провода не касается земли.

При заземлении оборвавшегося провода хотя бы с одной стороны фер-

резонансные перенапряжения не возникают.

5.2.5 Насыщение магнитной системы трансформатора ограничивает установившиеся феррорезонансные повышения напряжения до $2,5 \div 3U_{н.раб}$ частоты 50 Гц, которые мало зависят, как от номинальной мощности трансформатора, так и от длины неполнофазно отключенного участка линии.

5.2.6 В переходном процессе феррорезонансные перенапряжения могут кратковременно превышать величину $3,0U_{н.раб}$ и представляют собой нелинейные хаотические колебания, величина и длительность которых зависит от начальных условий (в частности, от момента коммутации).

5.2.7 В соответствии с ГОСТ 1516.3 повышение напряжения частоты 50 Гц величиной $2,0 U_{н.раб}$ допускается на электрооборудовании в течение не более 1 с. Таким образом, установившееся феррорезонансное повышение напряжения до $2,5 + 3U_{н.раб}$ представляет опасность для электрооборудования и может приводить к его повреждению.

5.2.8 Для предотвращения повреждения оборудования от феррорезонансных перенапряжений при неполнофазных режимах ВЛ 110 кВ с трансформатором (трансформаторами) с разземленной нейтралью обмотки ВН и обрыве провода ВЛ необходимо:

а) При эксплуатации электропередач 110 кВ с трансформаторами, подключенными к ВЛ без выключателей:

1) перед производством оперативных переключений заземлять нейтраль обмотки ВН силового трансформатора. Если к ВЛ подключено несколько трансформаторов без выключателей, то следует заземлить нейтраль хотя бы одного из них [1];

2) использовать защиту от непереключения фаз на линейном выключателе ПС, коммутирующем ВЛ, со следующей логикой действия. При возникновении неполнофазного режима при включении электропередачи (ручном или автоматическом) защита должна действовать на отключение линейного выключателя. Если неполнофазный режим возникает при ручном отключении ВЛ, то защита должна действовать на включение выключателя (при действии РЗ на отключение выключателя включение должно блокироваться). Указанные действия направлены на восстановление симметричного режима и позволяют избежать повреждения оборудования от феррорезонансных перенапряжений.

б) При проектировании, реконструкции и создании новых электропередач 110 кВ необходимо предусматривать:

1) подключение силовых трансформаторов с разземленной нейтралью к ВЛ только через выключатели, что позволит в случае феррорезонансных повышений напряжений отключить трансформаторы с разземленными нейтралью и прервать феррорезонанс;

2) применение выключателей, имеющих малую вероятность неполнофазных коммутаций. Это в первую очередь относится к линейным выключателям на ПС, питающих магистральные электропередачи;

3) при реконструкции подстанций замену воздушных выключателей

110 кВ, которые коммутируют ВЛ с подключенными к ней трансформаторами с разземленной нейтралью, на выключатели, имеющие малую вероятность неполнофазных коммутаций;

4) применение на магистральных ВЛ выключателей с номинальным током отключения выключателей, исключающих необходимость разземления нейтралей трансформаторов в целях снижения уровней токов короткого замыкания в сетях 110 кВ;

5) оснащение ПС с силовыми трансформаторами, работающими с разземленной нейтралью, трехфазным комплектом трансформаторов напряжения и выполнением релейной защиты, действующей на отключение выключателя при возникновении феррорезонанса.

5.3 Защита от резонансных повышений напряжений на отключенной в цикле ОАПВ ВЛ с ШР

5.3.1 После отключения аварийной фазы ВЛ с двух концов она подвергается влиянию через емкостные и индуктивные связи со стороны оставшихся в работе фаз. Это влияние приводит к протеканию в месте замыкания на землю тока подпитки дуги, а после погасания дуги – к появлению наведенного (восстанавливающегося) напряжения на отключенной фазе. После погасания дуги - подпитки (вторичной дуги) на отключенной в цикле ОАПВ фазе ВЛ с ШР и 100 % компенсации реактивной мощности имеет место резонанс напряжений на отключенной фазе, в результате чего установившееся напряжение превышает значение наибольшего рабочего фазного и ограничивается потерями на корону ВЛ (в зависимости от номинального напряжения и конструкции ВЛ) до $1,3 \div 1,4 U_{н.раб.}$ В соответствии с ГОСТ 1516.3 длительность такого повышения напряжения не должно превышать 20 с. Поэтому восстанавливающееся напряжение на отключенной фазе должно быть ограничено, чтобы избежать, во-первых, повреждения оборудования, подключенного к ВЛ, а во-вторых, чтобы напряжение на отключенной фазе не вызывало работу защиты от повышения напряжения и, как следствие, к трехфазному отключению ВЛ.

5.3.2 В соответствии с рекомендациями [7] ограничение восстанавливающегося напряжения на отключенной в цикле ОАПВ фазе ВЛ с ШР может осуществляться:

– установкой компенсационных реакторов (КР) в нейтралях ШР, что компенсирует междуфазные емкости и уменьшает восстанавливающееся напряжение;

– отключением группы ШР или одной фазы ШР, подключенной к поврежденной фазе ВЛ, на время бестоковой паузы ОАПВ, что изменяет параметры резонансного контура.

5.3.3 Физика явлений и основные соотношения приведены в Приложении Г.

5.3.4 В Таблице 5.1 приведен диапазон длин ВЛ 750 кВ при которых восстанавливающееся напряжения при ОАПВ носит резонансный характер и

превышает фазное напряжение.

Таблица 5.1

Число комплектов ШР на ВЛ	Номинальное напряжение ВЛ, 750 кВ
1	125÷150 км
2	250÷300 км
3	380÷440 км
4	500÷580 км

5.3.5 Повышения эффективности ОАПВ можно достичь с помощью устройства контроля погасания дуги подпитки, которое получило название устройства адаптивного ОАПВ.

Устройство контроля за состоянием дуги подпитки, обнаружив погасание дуги, разрешает немедленное повторное включение фазы. Если же погасание дуги не обнаружено в течение некоторого предельного времени (обычно 2,5÷3,0 с), устройство подает команду на отключение остальных двух фаз ВЛ.

5.4 Рекомендации по защите от резонансных повышений напряжений в неполнофазных режимах ВЛ напряжением 330-750 кВ

5.4.1 На ВЛ 330-750 кВ с подключенными ШР и работающих с компенсацией реактивной мощности близкой к 100 % при одностороннем неполнофазном включении ВЛ на невключенных фазах возможны резонансные повышения напряжения.

5.4.2 Величина повышений напряжения может составлять с учетом ограничивающего действия короны $1,2 \div 1,4 U_{н.раб.}$. Такая величина повышения напряжения допустима для изоляции электрооборудования, подключенного к ВЛ, 1 мин ÷ 20 с соответственно. ОПН в зависимости от наибольшего рабочего допустимого напряжения может выдерживать такое напряжение 10÷20 с. Таким образом, резонансные повышения напряжения на отключенной фазе при неполнофазном режиме может представлять опасность для электрооборудования.

5.4.3 В случае появления неполнофазного включения ВЛ с ШР и 100 % компенсацией реактивной мощности следует принять меры по предотвращению резонансных повышений напряжения, а именно:

- восстановить симметричный режим, отключив выключатель тремя фазами;

- отключить одну группу ШР на ВЛ, снижая тем самым степень компенсации реактивной мощности и изменяя параметры резонансного контура.

5.4.4 Возможные повышения напряжений при несимметричном включении ВЛ с различным числом ШР на ВЛ, то есть, различной степенью компенсации реактивной мощности, следует определить расчетом с использованием программы расчета переходных процессов (Коммерческие программы для расчета переходных процессов в электрических сетях: NI Multisim, Simulink, EMTP-RV, ATP-EMTP, MicroTran, RTDS Simulator, PSCAD-

EMTDC и др.) и выяснить при каком числе ШР на ВЛ резонансные повышения напряжения не превышают фазного напряжения и потому безопасны для электрооборудования.

Расчетная схема должна представлять односторонне включенную ВЛ с распределенными параметрами, подключенными к ней ШР, предвключенный реактанс системы и выключатель, позволяющий создавать неполнофазный режим. Для более правильного определения напряжения на отключенной фазе следует применять на ВЛ модель короны на переменном напряжении.

5.5 Рекомендации по защите от феррорезонансных повышений напряжения ВЛ 330-750 кВ с ШР при наличии параллельной ВЛ

5.5.1 При двухстороннем отключении ВЛ 330-750 кВ с подключенными ШР, которые работают с компенсацией реактивной мощности близкой к 100%, при наличии параллельной ВЛ, находящейся под напряжением, того же класса напряжения или выше возможны резонансные повышения напряжения.

5.5.2 В зависимости от степени компенсации реактивной мощности отключенной ВЛ расстояния между параллельными ВЛ и длиной параллельных участков ВЛ резонансные повышения напряжения могут составлять $1,2 \div 1,4 U_{н.раб}$, что согласно 5.4.2 может представлять опасность для изоляции электрооборудования, подключенного к ВЛ и ОПН.

5.5.3 Возможные повышения напряжения при отключении ВЛ 330-750 кВ с ШР, имеющих параллельные ВЛ того же класса напряжения или выше, следует определить расчетом по программам переходных процессов и выяснить число ШР на отключенной ВЛ, при котором повышения напряжения не представляют опасности для изоляции оборудования ВЛ.

5.5.4 При плановых или автоматических отключениях ВЛ 330-750 кВ, имеющих степень компенсации емкостного тока близкую к 100 % и участок параллельной ВЛ того же класса напряжения или выше следует одновременно с отключением линейных выключателей отключить не менее одной группы ШР.

5.6 Рекомендации по защите от феррорезонансных повышений напряжения в РУ напряжением 330 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения

5.6.1 Феррорезонансные повышения напряжения возможны при отключении системы шин ОРУ 330 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения выключателями, дугогасительные камеры которых имеют несколько разрывов, шунтированных емкостными делителями.

5.6.2 Феррорезонанс невозможен при отключении шин ОРУ:

– 110 кВ, поскольку дугогасительные камеры выключателей имеют один разрыв и не имеют емкости, шунтирующие контакт;

– 220 кВ, на которых применены только элегазовые выключатели, поскольку современные элегазовые выключатели 220 кВ имеют один разрыв и

шунтирующие конденсаторы у них отсутствуют;

– 750 кВ, поскольку в ОРУ 750 кВ применяются только емкостные трансформаторы напряжения (НДЕ).

5.6.3 Однолинейная схема замещения феррорезонансного контура при отключении системы шин с электромагнитными трансформаторами напряжений приведена в приложении А.

5.6.4 Для определения возможности возникновения феррорезонанса необходимо определить параметры всех элементов схемы замещения рисунка В.5 приложения В: суммарные емкости выключателей, системы шин и характеристику намагничивания трансформатора напряжения.

Характеристики намагничивания, например, ТН НКФ-220 и НКФ-500 приведены в Приложении Д.

5.6.5 Емкости, шунтирующие контакты отечественных и некоторых зарубежных воздушных выключателей 220÷330 кВ приведены в приложении Е.

Современные элегазовые выключатели 330 кВ, устанавливаемые в ОРУ, выполняются с двумя разрывами на фазу. Емкость, шунтирующая эти разрывы, составляет порядка 1000÷1500 пФ.

Примечание – При установке в РУ элегазовых выключателей 330 кВ следует уточнить у производителей величину емкости, шунтирующей контакты выключателя.

Суммарная емкость шин определяется параметрами, приведенными в Таблице 5.2, включающие емкость самой ошиновки и емкость на землю подключенного к ней оборудования (выключателей, разъединителей, ТН, ТТ, ОПН).

Таблица 5.2 – Усредненные значения емкостей фаза-земля элементов ОРУ 220-330 кВ [6]

Класс напряжения, кВ	220	330
Ошиновка, пФ/м	8,2÷8,5	9,7÷10,0
Разъединитель, пФ на фазу	100÷120	150÷180
Выключатель, пФ	100÷150	150÷200
ТН (НКФ), пФ на фазу	300÷350	350÷400
ТТ, пФ на фазу	400÷450	800÷850
ОПН, пФ на фазу	50	100

5.6.6 Для ОРУ 220-330 кВ с трансформаторами напряжения типа НКФ, возможность возникновения феррорезонанса при отключении системы шин следует предварительно определить по рисунку 5.3 и уточнить расчетом с использованием программы переходных процессов с учетом конкретной характеристики намагничивания электромагнитного трансформатора напряжения.

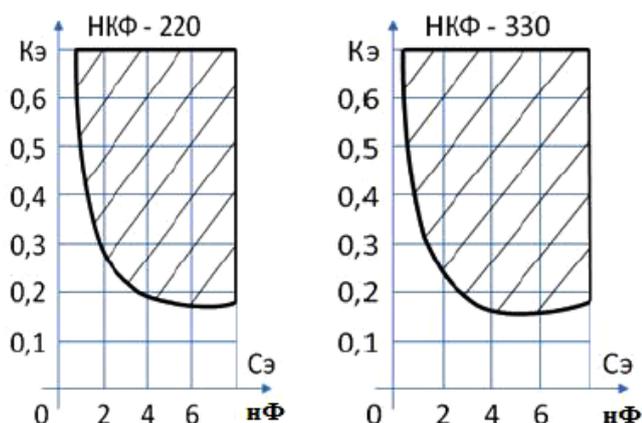


Рисунок 5.3 – Области существования ферререзонансных перенапряжений

заштрихованы [6,7]: $K_э = C_в / (C_ш + C_в)$; $C_э = C_в + C_{ш, нФ}$,

где: $C_в$ - суммарная емкость между разомкнутыми контактами всех выключателей, нФ;

$C_ш$ - суммарная емкость на землю всех элементов отключенной части РУ, нФ.

5.6.7 Для предотвращения ферререзонансных повышений напряжения, при отключении системы шин с электромагнитными ТН выключателями, у которых дугогасительные разрывы шунтированы конденсаторами, необходимо предусматривать одно из следующих мероприятий:

- применение антирезонансных трансформаторов напряжения, например, НАМИ;

- увеличение емкости системы шин путем подключения к ней конденсаторов (например, конденсаторов связи). При этом суммарная емкость их должна быть достаточной для вывода схемы из зоны, опасной с точки зрения ферререзонанса. Необходимая дополнительная емкость определяется расчетным путем. Подключаться конденсаторы к шинам должны без выключателей. Если выключатели имеются, то они не должны отключаться при отключениях систем шин;

- введение запрета (при производстве оперативных переключений, при работе ДЗШ/УРОВ) на отключение одной из ВЛ, отходящей от шин РУ и отключенной с противоположной стороны, либо на отключение трансформатора или автотрансформатора, у которого предварительно отключено напряжение со стороны обмоток смежного напряжения. Трансформатор, присоединенный к отключаемым шинам, должен иметь заземленную нейтраль обмотки ВН.

5.6.8 Параллельная работа электромагнитных трансформаторов напряжения типа НКФ с трансформаторами напряжения типа НДЕ или НАМИ не предотвращает ферререзонанс, поскольку условия возникновения гармонических ферререзонансных повышений напряжения в этом случае определяются трансформатором НКФ.

5.7 Рекомендации по защите от резонансных повышений напряжений РУ с комплектным элегазовым оборудованием

КРУЭ 110-750 кВ выполняются с электромагнитными трансформаторами напряжения. Выключатели КРУЭ 110-220 кВ имеют один разрыв и по-

тому феррорезонанс в КРУЭ этого класса напряжения невозможен.

Выключатели КРУЭ 330 кВ могут иметь два разрыва с шунтирующими емкостями 1000÷1500 пФ на разрыв. В этом случае в соответствии с рекомендациями [10] должны применяться антирезонансные ТН.

Поставщик КРУЭ должен подтвердить отсутствие феррорезонанса в конкретной схеме КРУЭ расчетом и предоставить эксплуатирующей организации [15]:

- тип выключателей КРУЭ и количество разрывов на фазу;
- значения емкостей, шунтирующих разрывы выключателей;
- удельную погонную емкость шин;
- параметры высоковольтной обмотки трансформаторов напряжения, применяемых в КРУЭ 330 кВ (характеристика намагничивания, значения индуктивности рассеяния и активного сопротивления обмотки);
- технические решения изготовителя ТН, используемого в КРУЭ, по предотвращению феррорезонансных повышений напряжений при отключении системы шин и эффективности их применения в конкретной схеме КРУЭ.

Если антирезонансный характер ТН не подтверждается, то следует применять меры по предотвращению феррорезонансных повышений напряжений:

- каждое присоединение отключать выключателем и соответствующим ему разъединителем;
- ввести запрет (при производстве оперативных переключений, при работе ДЗШ/УРОВ) на отключение одной из ВЛ, отходящей от шин КРУЭ и отключенной с противоположной стороны.

5.8 Защита от резонансных повышений напряжений на второй гармонике в электропередачах 330-750 кВ с ШР

5.8.1 При включении ВЛ 330-750 кВ с ШР возможны перенапряжения на второй гармонике, если первая собственная частота схемы близка к 2ω . Величина перенапряжений может составлять $1,2\div 1,45U_{н.раб}$, длительность существования перенапряжений зависит от параметров сети и составляет несколько секунд [6].

5.8.2 Основные факторы, существенно влияющие на возникновение перенапряжений второй гармонике, следующие:

- величина питающего напряжения. Чем выше величина эквивалентной ЭДС системы, тем выше вероятность возникновения и уровень перенапряжений на второй гармонической напряжении,
- мощность питающей системы. Перенапряжения на второй гармонике возникают только при включении от маломощной системы, которая характеризуется величиной предвключенного реактанса сети, приведенного к напряжению коммутируемой ВЛ (X_1). При величине X_1 меньше 100 Ом резонанс на вторую гармонику практически не развивается,
- возникновение и величина повышения напряжения ВЛ на второй

гармонике существенно зависит от фазы включения выключателя относительно ЭДС сети. При включении в максимум напряжения ЭДС повышения напряжения при возникновении второй гармонической минимальны, при включении вблизи нуля напряжения (максимум тока) повышения напряжения максимальны. Поскольку фаза включения выключателя относительно ЭДС случайна, то при прочих равных условиях случайна и величина повышения напряжения на второй гармонике.

5.8.3 Защита от повышения напряжения настроена на действующее значение напряжения и потому не реагирует на повышение напряжения на второй гармонической напряжении. Для регистрации возникновения перенапряжений на второй гармонике необходима настройка защиты на амплитудное значение повышения напряжения.

5.8.4 Для снижения величины повышения напряжения на второй гармонике при плановом включении ВЛ с ШР необходимо:

- понизить напряжение на шинах, к которым подключается ВЛ;
- включение ВЛ проводить от шин более мощной из систем, которые она соединяет.

5.8.5 В наиболее неблагоприятных режимах величина и длительность существования перенапряжений на второй гармонике может существенно превышать нормируемые ГОСТ 1516.3 величины для электрооборудования. В этом случае ручная синхронизация невозможна и необходимо применять полуавтоматическое замыкание ВЛ в транзит.

Полный цикл этих операций включает в себя:

- оперативное включение линии с первого заранее выбранного конца ВЛ;
- контроль появления рабочего напряжения;
- фиксация отсутствия повреждения;
- улавливание синхронизма;
- автоматическое включение выключателя второго конца.

Таким образом, исключается длительный режим одностороннего включенной ВЛ и, соответственно, не развиваются опасные для электрооборудования повышения напряжения от второй гармонике.

Полуавтоматическое замыкание в транзит может быть выполнено с помощью штатных устройств АПВ.

5.9 Рекомендации по защите от феррорезонанса в емкостных трансформаторах напряжения.

Обычные емкостные трансформаторы напряжения имеют индуктивный промежуточный трансформатор и компенсационную катушку. Вместе с первичным и вторичным конденсаторами они содержат все компоненты, необходимые для формирования феррорезонансной цепи. Поэтому емкостные трансформаторы напряжения могут генерировать феррорезонансные колебания без дополнительной последовательной мощности. Их конструкция долж-

на исключать возможность установившихся феррорезонансных колебаний во всех возможных условиях эксплуатации [14].

Наиболее распространенными методами гашения феррорезонансных колебаний в емкостных трансформаторах напряжения являются LC-резонансные цепи с малыми потерями.

При разработке технических требований на закупку емкостных ТН рекомендуется указывать антирезонансные свойства ТН.

Приложение А (справочное)

Экспериментальные исследования, методы испытаний и практические измерения. Компьютерное моделирование феррорезонансных колебаний

А.1 При проектировании и эксплуатации подстанций рекомендуется проводить математические и натурные эксперименты по определению возможности возникновения ФРП. Методические подходы к моделированию и измерению электрофизических процессов связанных с ФРП приведены в [13].

А.2 Измерение феррорезонансных колебаний

Измерения обычно проводятся во время испытаний на переключение, чтобы выяснить, возникают ли феррорезонансные колебания в определенных конфигурациях. Наиболее чувствительной переменной для обнаружения феррорезонанса является ток через первичную обмотку индуктивного трансформатора напряжения. Для измерения этого тока, который при нормальной работе составляет несколько мА, можно использовать два альтернативных метода:

1. Токовые клещи устанавливаются вокруг заземления обмотки высокого напряжения. В этом случае характеристики передачи токовых клещей должны быть проверены в диапазоне частот от 0 Гц до 10 кГц;

2. Измерительный шунт обычно 10 Ом вводится между клеммой заземления обмотки ВН X и землей. Измерительные кабели должны быть скручены и экранированы.

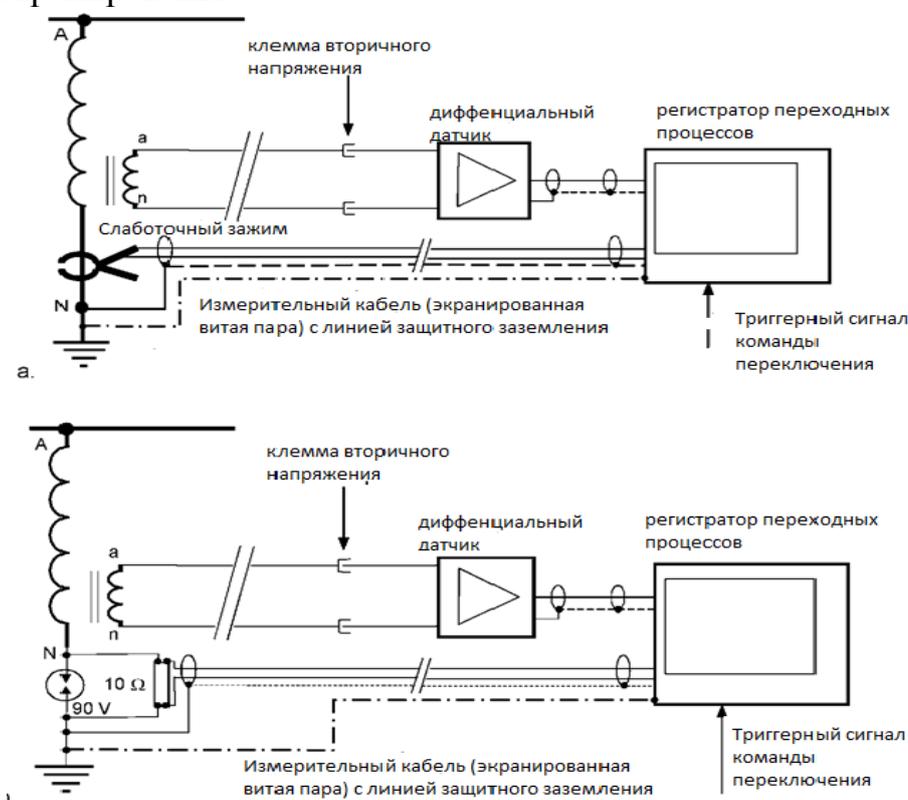
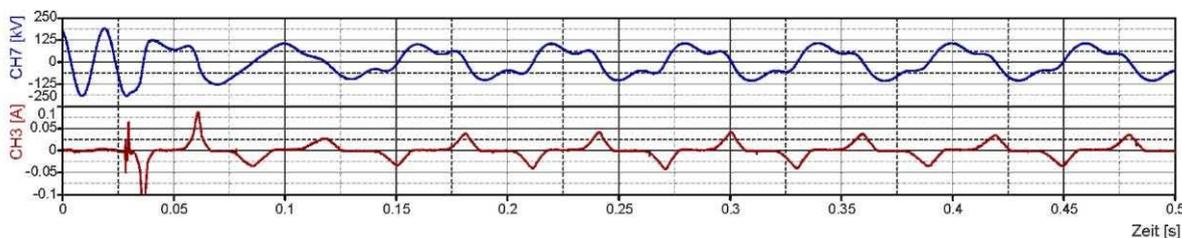


Рисунок А.1 – Схема измерения феррорезонансных колебаний

Примечание – Заземление первичной обмотки ни в коем случае нельзя размыкать во время работы, так как в противном случае на клемме N возникнет высокое напряжение. По этой же причине резистор должен быть рассчитан на максимально возможный ток через первичную обмотку. Элемент защиты от перенапряжения между клеммой заземления и клеммой заземления первичной обмотки N должен быть установлен в качестве меры безопасности. В случае феррорезонанса пиковые значения тока первичной обмотки будут находиться в пределах от 20 мА до нескольких сотен мА. Только в крайних случаях они будут порядка 1 А.

Для подробного экспериментального анализа поведения феррорезонанса, например, проверка компьютерного моделирования, требуются многоканальные измерения (включая напряжение источника, напряжение на нагрузке индуктивного трансформатора напряжения, ток через демпфирующие устройства, если таковые имеются, и дополнительные сигналы). Если измеряются только напряжения (рисунок А.2, верхняя кривая осциллограммы), обычно невозможно четко различить колебания без насыщения сердечника и с насыщением (феррорезонанс) и с опасными высокими токами в первичной обмотке. О степени насыщения можно судить по амплитуде узких пиков тока (см. рисунок А.2, нижняя кривая осциллограммы). В приведенном выше примере автоматический выключатель срабатывал в пик напряжения. Это считается наихудшим состоянием. Кривая напряжения дает сигнал частотой $16\frac{2}{3}$ Гц. Ток через первичную обмотку, который обычно составляет порядка 1 мА, достигает в начале более 100 мА и остается на пике 50 мА в установившихся условиях. Обе кривые показывают, что индуктивный трансформатор напряжения совершает установившиеся феррорезонансные колебания. Первичная обмотка может быть перегрета током через обмотку при феррорезонансных колебаниях. Поскольку токи утечки на изолирующих поверхностях подстанций высокого напряжения могут значительно ослабить или предотвратить феррорезонансные колебания, экспериментальные исследования в распределительных устройствах с воздушной изоляцией следует проводить только в сухих погодных условиях. Измерения должны выполняться на всех трех фазах одновременно как для однофазных, так и для трехфазных феррорезонансных колебаний.



**Рисунок А.2 – Измерение однофазного феррорезонансного колебания:
Пример определения установленного однофазного феррорезонансного колебания с частотой $16\frac{2}{3}$ Гц в ячейке 220 кВ**

А.3 Моделирование феррорезонансных процессов

Как и для любой другой физической задачи, имеющей дело с нелинейными элементами, не существует общего самосогласованного аналитическо-

го решения для математического представления феррорезонансных колебаний. Поэтому необходимы численные методы. Помимо моделирования, которое определяет решение, зависящее от времени, для дискретной конфигурации также доступны другие методы, которые показывают области существования различных режимов феррорезонанса без необходимости определения решений, зависящих от времени. Недостатком последних является то, что с ними трудно работать на практике, и они не могут предоставить никакой информации об ожидаемых формах сигналов тока и напряжения и их соответствующих амплитудах. Моделирование, с другой стороны, предоставляет эту информацию. Однако это относится только к конкретной исследуемой конфигурации и не дает никакого общего результата.

А.4 Характеристика намагничивания

На рисунке А.3 показана типичная кривая гистерезиса индуктивного трансформатора напряжения. Результаты моделирования показали, что даже небольшие изменения параметров схемы, а также характеристики намагничивания могут привести к совершенно разным результатам. По этой причине важно, чтобы анализ максимально соответствовал реальной кривой намагничивания, в области насыщения. Расчетные кривые намагничивания, исходя из свойств материала, часто могут значительно отличаться от измеренных кривых. Таким образом, именно измерение чаще всего представляет наиболее точный вариант определения характеристики намагничивания. Для измерения кривой намагничивания необходимо использовать проверенные методы.

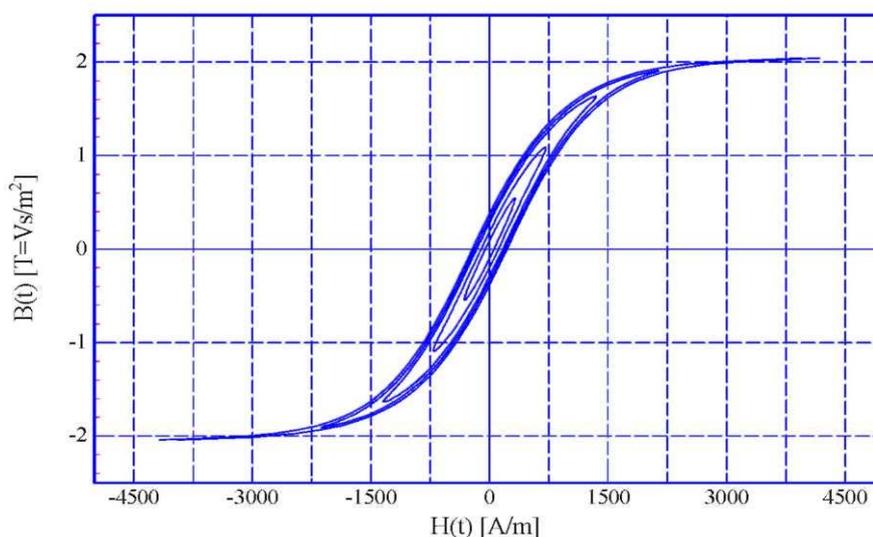


Рисунок А.3 – Пример кривой гистерезиса трансформатора напряжения на частоте 50 Hz]

Тем не менее, даже при проведении измерений необходимо тщательно учитывать паразитные влияния. Поскольку нас интересует только магнитное поведение основной индуктивности, емкостные эффекты будут искажать результаты измерений. Эти паразитные емкостные влияния будут возникать при проведении измерений на собранном трансформаторе напряжения. Чтобы избежать этого эффекта, рекомендуется измерять характеристику намагничивания только на железном сердечнике.

Кроме того, необходимо гарантировать, что поведение насыщения будет доступно до достаточно высокого возбуждения $H(t)$. Форма кривой намагничивания, подходящая для моделирования, представляет собой представление плотности магнитного потока $B(t)$ в зависимости от возбуждения $H(t)$.

Другой важной переменной, влияющей на точность результатов анализа и моделирования, являются потери в феррорезонансном контуре. Эти потери влияют на то, станет ли колебание установившимся или нет. Схема на рисунке 6 содержит различные компоненты эквивалентных потерь. Потери, возникающие в самом индуктивном трансформаторе напряжения, заключаются с одной стороны в импедансе Z_{XC} высоковольтной обмотки. С другой стороны, нелинейное сопротивление R_{Fe} представляет собой потери из-за гистерезиса в сердечнике. Потери, возникающие из-за подключенных нагрузок, представлены импедансом нагрузки Z_B . Другие источники потерь в распределительном устройстве, такие как ток утечки изоляторов, ток через металлооксидные разрядники или коронные разряды суммируются в сопротивлении R_e , параллельном емкости земли C_e . В то время как потери трансформатора напряжения в основном достаточно известны из спецификаций производителя, другие потери различаются от подстанции к подстанции. Они зависят от временных переменных, таких как погода и степень загрязнения, и в основном неизвестны. В зависимости от типа и конструкции оборудования значение сопротивления R_e , безусловно, может изменяться на несколько порядков. Типичные значения для подстанции с воздушной изоляцией 420 кВ составляют от нескольких МОм до нескольких ГОм. Благодаря базовой конструкции потери в распределительных устройствах с элегазовой изоляцией значительно ниже, чем в распределительных устройствах с воздушной изоляцией.

А.5 Трехфазные феррорезонансные колебания

В отличие от однофазных феррорезонансных конфигураций, для моделирования требуются все параметры, описывающие отдельные фазы, и дополнительно все параметры, описывающие индуктивную и емкостную связь трех фаз, например, связь через силовой трансформатор и разделительные емкости. Дополнительно необходимы данные о типе и параметрах силового трансформатора.

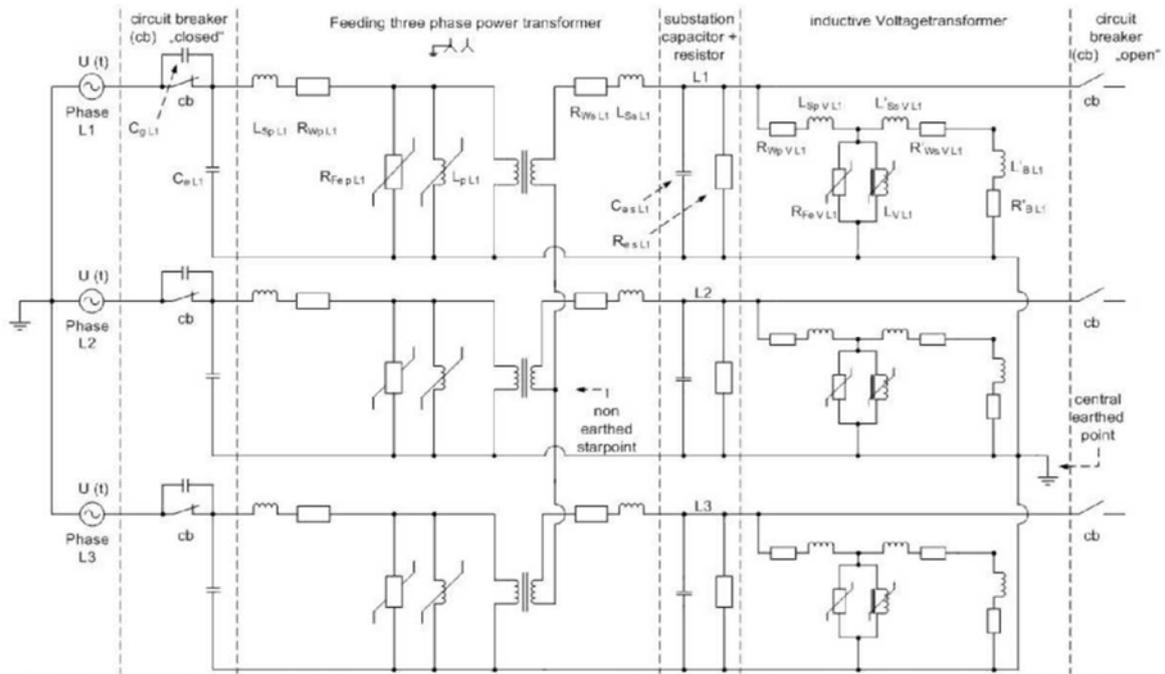
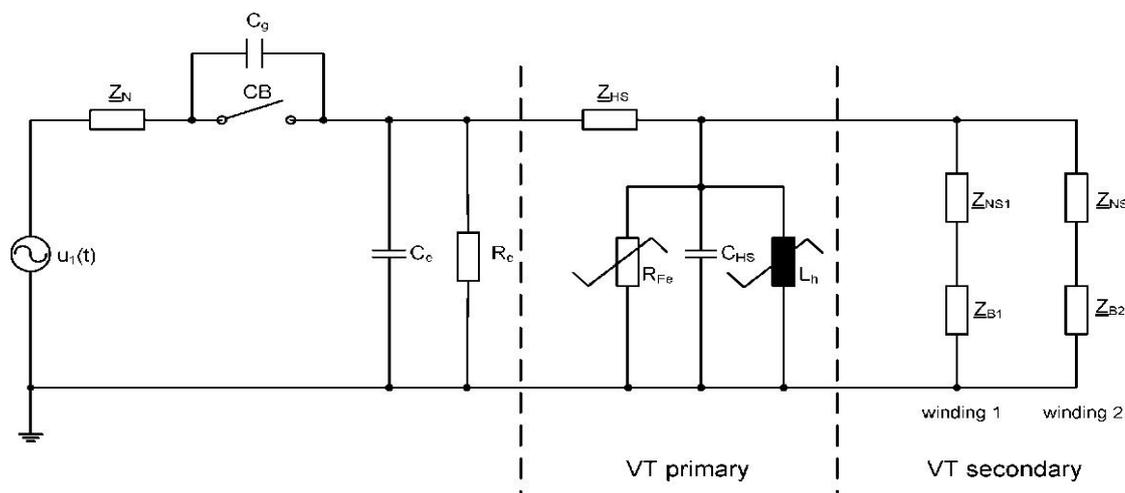


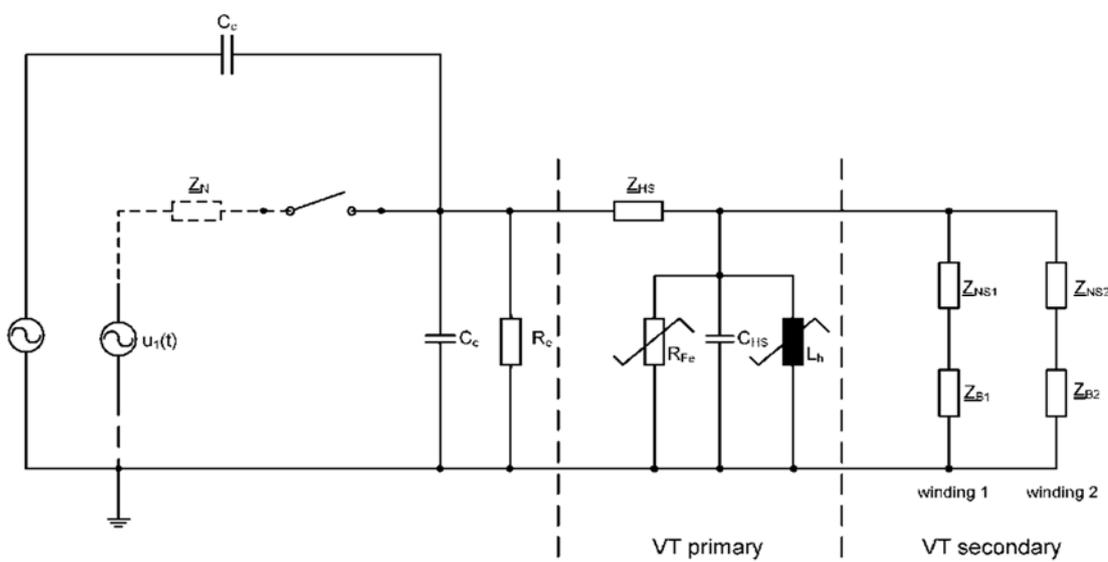
Рисунок А.4 – Схема из трех однофазных трансформаторов напряжения для исследования трехфазных феррорезонансных колебаний

А.6 Однофазные феррорезонансные колебания

На рисунке А.5 показаны общие принципиальные схемы для анализа однофазных феррорезонансных колебаний. На рисунках А.5а и А.5б показаны два различных способа возбуждения.



а)



б)

Рисунок А.5 – Электрические цепи для теоретического анализа однофазных феррорезонансных колебаний

а) Возбуждение феррорезонансных колебаний через градуировочный конденсатор выключателя

б) Возбуждение феррорезонансных колебаний через емкость параллельной системы

где, C_c - Емкость связи с параллельной системой более высокого уровня напряжения; C_g Емкость выравнивающего конденсатора выключателя; C_e - Внешнее сопротивление фаза-земля напр. сквозные токи в грязных поверхностях, корона токи и токи металлооксидных разрядников; R_{Fe} - Нелинейное сопротивление, представляющее потери в стали индуктивного ТН; L_h - Нелинейная основная индуктивность высоковольтной обмотки индуктивного ТН; $u_1(t)$ - Напряжение фаза-земля перед автоматическим выключателем в системе; $u_2(t)$ Напряжение соседней системы более высокого уровня напряжения, с которой емкостная связь; Трансформатор напряжения ТН - Z_{B1} - Полное сопротивление нагрузки вторичной обмотки 1 (сопротивление нагрузки и индуктивность); Z_{B2} - Полное сопротивление нагрузки вторичной обмотки 2 (сопротивление нагрузки и индуктивность); Z_C - Полное сопротивление обмотки ВН (сопротивление и паразитная индуктивность); Z_N - Полное сопротивление сети; Z_{NS1} Полное сопротивление вторичной обмотки 1 (сопротивление и паразитная индуктивность) Z_{NS2} - Полное сопротивление вторичной обмотки 2 (сопротивление и паразитная индуктивность)

А.7 Методика расчета и рекомендации по построению математической модели

А.7.1 Описание математической модели [16]

Математической моделью феррорезонансных явлений в сетях номинальным напряжением 110 кВ и выше при коммутации выключателей, имеющих конденсаторы, шунтирующие дугогасительные устройства, является система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих схему замещения, представленную на рисунке А.6.

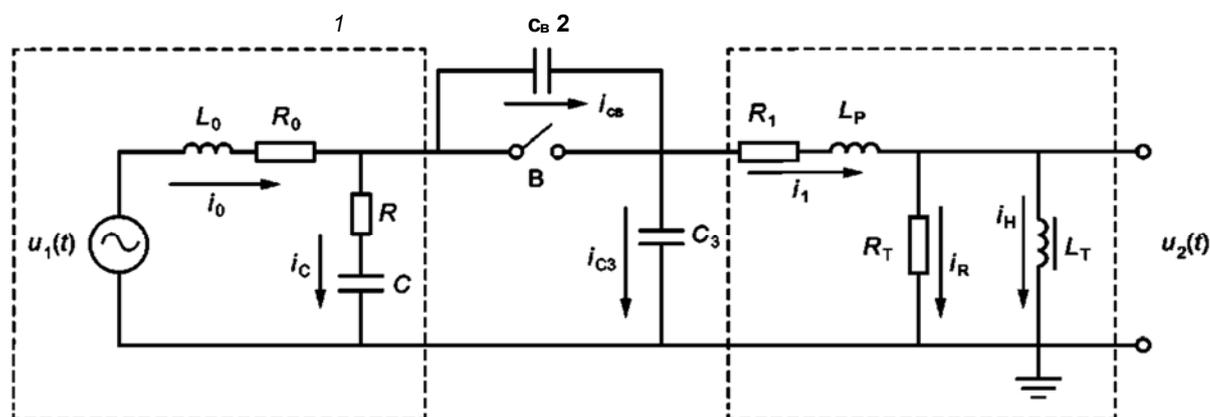


Рисунок А.6 – Электрическая схема модели для исследования феррорезонансных процессов взаимодействия трансформатора напряжения с емкостями сети

1 — источник питания; 2 — испытуемый трансформатор; $u_1(t)$ — источник синусоидального напряжения; $u_2(t)$ — напряжение на вторичных выводах испытуемого трансформатора; i_0 — ток источника питания; i_c — собственный ток источника питания; $i_{св}$ — ток через емкость, шунтирующую контакты выключателя; $i_{с3}$ — ток через эквивалентную емкость электрооборудования на землю; i_1 — ток, через первичную обмотку трансформатора напряжения; i_R , i_H — ток через ветвь цепи намагничивания в схеме замещения испытуемого трансформатора; L_0 , R_0 , R , C — параметры источника питания; B — выключатель; $C_в$ — емкость между контактами выключателя; C_3 — суммарная эквивалентная емкость на землю; R_1 — активное сопротивление первичной обмотки испытуемого трансформатора; L — индуктивность рассеяния обмотки ВН испытуемого трансформатора; R_T — сопротивление, эквивалентное потерям в стали испытуемого трансформатора; L_T — нелинейная индуктивность испытуемого трансформатора

При воспроизведении условий реальной сети источник питания представлен индуктивностью короткого замыкания L_0 и параллельно подключенной к источнику схемой, воспроизводящей переходные характеристики сети согласно ГОСТ 687, приложение 6. Там же приведены формулы и примеры расчета этих параметров. В приведенной на рисунке А.6 схеме применена упрощенная схема воспроизведения параметров сети, состоящая из цепочки R–C, согласно ГОСТ 687.

При воспроизведении испытаний трансформатора напряжения в лабораторных условиях L_0 — это индуктивность рассеяния обмотки ВН испытательного трансформатора, R_0 — сопротивление обмотки ВН постоянному току, C — собственная емкость обмотки ВН, а значение R может быть принято равным нулю. Индуктивностью рассеяния и активным сопротивлением обмоток НН трансформаторов, как испытуемого, так и испытательного, пренебрегают. Кривую намагничивания испытательного трансформатора нет необходимости воспроизводить, так как он по определению должен воспроизводить синусоидальное напряжение без искажения его формы во всем диапазоне испытательных напряжений, необходимых для данного испытуемого трансформатора.

Таким образом, для моделирования феррорезонансных процессов может быть применена одна и та же конфигурация схемы замещения и, соответственно, одна и та же система уравнений, ее отображающая, как для реальной сети, так и для лабораторных испытаний, с разницей лишь в значениях параметров источника.

Рассматривается ненагруженный трансформатор напряжения, так как в этом случае магнитопровод намагничивается в наибольшей степени.

Систему дифференциальных уравнений первого порядка для применения машинных методов численного интегрирования, например Рунге – Кутта, представляют в форме:

$$\frac{dY_i}{dt} = f(Y_1, Y_2 \dots Y_n, t), \quad (A.1)$$

где, i – порядковый номер искомой переменной от 1 до n и соответствующий ему номер уравнения;

n – число уравнений;

t – время как независимая переменная.

Для схемы, представленной на рисунке А.6, система уравнений выглядит следующим образом:

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{u_1(t) - i_0 R_0 - u_0 - i_0 R}{L_0} \quad (A.2)$$

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C} \quad (A.3)$$

$$\frac{du_{CB}}{dt} = \frac{i_{CB}}{C_B} \quad (A.4)$$

$$\frac{du_{C3}}{dt} = \frac{i_{C3}}{C_3} \quad (A.5)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u_{C3} - i_1 R_1 - (i_1 - i_H) R_T}{L_p} \quad (A.6)$$

$$\frac{di_H}{dt} = \frac{(i_1 - i_H) R_T}{L_T} \quad (A.7)$$

В этих уравнениях i_c , i_{CB} и i_{C3} вычисляются следующим образом:

$$\text{если } R \neq 0, \text{ то } i_c = \frac{u_1(t) - i_0 R_0 - L_0 \frac{di_0}{dt} - u_c}{R} \quad (A.8)$$

$$i_{CB} = i_0 - i_c \quad (A.9)$$

$$i_{C3} = i_{CB} - i_1 \quad (A.10)$$

$$\text{если } R = 0, \text{ то } i_{CB} = \frac{\frac{i_0}{C} + \frac{i_1}{C_3}}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_3}} \quad (A.11)$$

Нелинейную индуктивность испытуемого трансформатора определяют по кривой намагничивания (см. рисунок А.5):

$$L_T = \frac{d\Psi_m}{di_m} \quad (A.12)$$

Мгновенные значения потокосцепления и его первой производной определяют методами интерполяции или аппроксимации аналитической функцией по экспериментально определенной характеристике намагничивания (см. рисунок А.5).

А.7.2 Определение параметров схемы замещения трансформатора напряжения

Определение полного сопротивления короткого замыкания, омического сопротивления обмотки высокого напряжения и потерь холостого хода испытуемого и испытательного трансформаторов

Сопротивление короткого замыкания, приведенного к стороне высокого напряжения $ZK_{ВН}$

$$ZK_{ВН} = ZK_{НН} \left(\frac{U_{ВН}}{U_{НН}} \right)^2, \quad (A.13)$$

где, $U_{ВН}$ – измеренное напряжение на обмотке высокого напряжения (ВН);

$U_{НН}$ – измеренное напряжение на обмотке низкого напряжения (НН).

Сопротивление короткого замыкания $ZK_{НН}$

$$ZK_{НН} = \frac{U_K}{I_K} \quad (A.14)$$

где, U_K – измеренное напряжение подаваемого на основную обмотку низкого напряжения при закороченной обмотке высокого напряжения;

I_K – измеренный ток подаваемого на основную обмотку низкого напряжения при закороченной обмотке высокого напряжения.

Значение индуктивности рассеяния с учетом активного сопротивления первичной обмотки напряжения L_p :

$$L_p = \frac{\sqrt{ZK_{ВН}^2 - R_1^2}}{2\pi f_{НОМ}} \quad (A.15)$$

где, R_1 – измеренное активное сопротивление первичной обмотки постоянному току.

Значение сопротивления, эквивалентного потерям в стали R_T определяют по данным измерений мощности активных потерь $P_{СТ}$ в опыте холостого хода:

$$R_T = \frac{U_{ВН}^2}{P_{СТ}} \quad (A.16)$$

А.7.3 Экспериментальное определение характеристики намагничивания [16]

Характеристику намагничивания трансформатора напряжения определяют в опыте холостого хода. При каждом измерении устанавливают по амперметру нужное значение тока и осциллографируют ток и напряжение. За значение I_T принимают амплитудное значение тока. Соответствующее значение Ψ_T определяют интегрированием:

$$\Psi(t) = \int_0^t (u - i \cdot R) dt, \quad (A.17)$$

где u и i – мгновенные значения тока и напряжения;

R – сопротивление обмотки постоянному току. За начало интегрирования принимают момент нуля тока. Значение Ψ_T определяют, как амплитудное значение $\Psi(t)$.

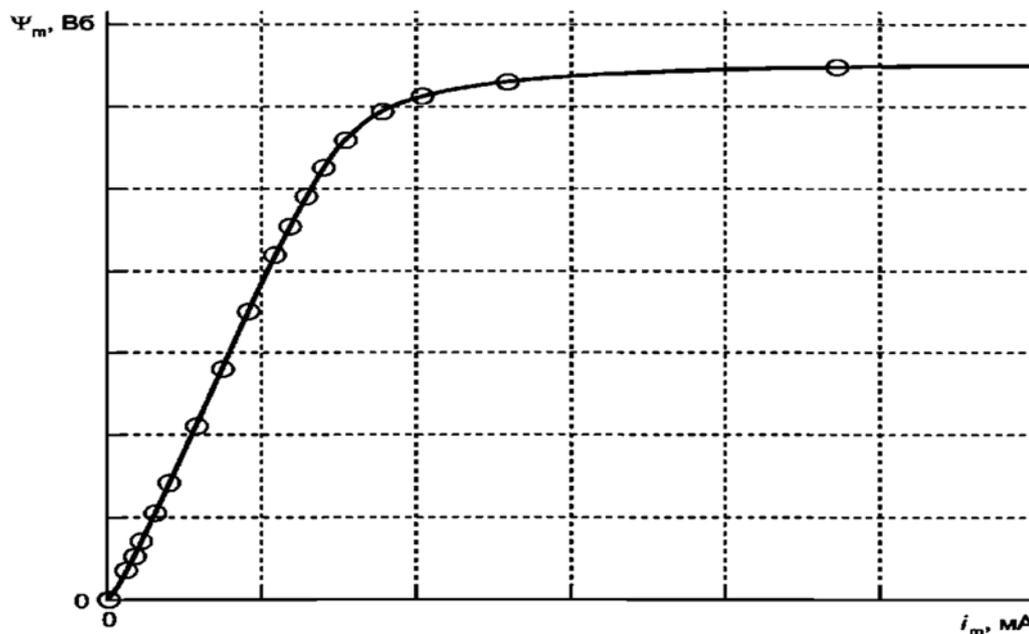


Рисунок А.7 – Экспериментально полученная кривая намагничивания

А.8 Расчет индуктивности трансформатора напряжения

С учётом увеличения индуктивности, за счёт неполного насыщения в 1,3 раза, получена формула для расчёта индуктивности насыщения ТН [2]: Индуктивность насыщения L_s ТН определяем по выражению

$$L_s = 1,3 \frac{\pi}{4} \omega^2 \frac{d^2}{a} (K_a - K) \mu_0, \text{ Гн} \quad (A.18)$$

где, ω - число витков первичной обмотки;

d - средний диаметр обмотки, м;

a - высота обмотки, м;

K_a, K - коэффициенты формы обмотки, принимаемые по [9] (таблицы 6.2 и 6.6);

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха.

Выражение для расчета индуктивности холостого хода L_{xx}

$$L_{xx} = \frac{100 \sqrt{(\omega L_s)^2 + R_{BH}^2}}{\omega E_k}, \text{ Гн} \quad (A.19)$$

где, E_k – напряжение короткого замыкания, %. Величины E_k и R_{BH} (сопротивление первичной обмотки постоянному току) – по данным изготовителей ТН.

Приложение Б (справочное)

Устройства для подавления (затухания) феррорезонансных колебаний

Следующие дополнительные демпфирующие устройства успешно применялись на подстанциях высокого напряжения [СТБ МЭК TR]. Феррорезонансные колебания могут происходить в двух разных режимах. Однофазный и трехфазный феррорезонанс необходимо различать и обрабатывать по-разному. Для гашения однофазных феррорезонансных колебаний к вторичной обмотке каждой фазы трансформатора напряжения подключают демпфирующее устройство. Демпфирующее устройство может быть выполнено в виде:

– Резисторы (линейные или нелинейные) Резистор должен иметь такие размеры, чтобы выдерживать условия постоянной работы и дополнительно кратковременную работу по гашению феррорезонанса с адиабатическим повышением температуры

– Насыщаемые катушки: при нормальной работе эта катушка имеет низкие потери, во время феррорезонансных колебаний катушка достигает насыщения и представляет собой большие потери, подходящие для гашения колебаний. Расчет рабочего напряжения катушки должен основываться на указанном коэффициенте напряжения.

– Комбинация резисторов и катушек при нормальной работе эта катушка и резистор имеют малые потери, во время феррорезонансных колебаний катушка достигает насыщения и вместе с резистором представляет большие потери, подходящие для гашения колебаний. Резистор ограничивает ток через катушку. Расчет рабочего напряжения катушки и резистора, соединенных последовательно, должен основываться на указанном коэффициенте напряжения.

– Катушка в сочетании с конденсатором (настроенным на частоту феррорезонанса) катушка и конденсатор настроены на резонансную частоту феррорезонансных колебаний (например, 16 2/3 Гц, 10 Гц, 7 1/7 Гц). В случае колебаний схема эффективно их гасит. Для каждой частоты должна быть подключена отдельная цепь.

При подключении демпфирующего устройства и указанной нагрузки к вторичной обмотке требования к точности должны соответствовать указанным значениям (ГОСТ 1983). Часто удается подключить трансформатор напряжения с его номинальной нагрузкой.

Примечание – Практичным решением также является подключение демпфирующего устройства в открытом треугольнике. Следует отметить, что это решение не будет работать, если все три фазы будут показывать одинаковые феррорезонансные колебания.

Гашение 3-фазных феррорезонансных колебаний может быть реализовано в соединении трансформаторов напряжения разомкнутым треугольником в фидерной ячейке или в нейтрали силового трансформатора.

В обоих случаях необходимо учитывать, что демпфирующее устройство специальных размеров должно выдерживать замыкания фазы на землю в сети ($1,9 U_n$; 8 ч).

Экономическая эффективность, какую альтернативу можно использовать, решается в каждом индивидуальном случае. Часто используемый метод демпфирования трехфазного феррорезонанса заключается в подключении демпфирующего устройства специального размера к соединению открытого треугольника трансформатора напряжения, например, можно подключить устройства защиты от феррорезонанса СЗТн или СЗТн-2 [13].

Можно использовать альтернативную меру демпфирования, если трансформаторы напряжения в ячейке фидеров не имеют обмотки для соединения по схеме «открытый треугольник». Дополнительный трансформатор напряжения установлен в точке звезды на вторичной стороне силового трансформатора. С помощью демпфирующего устройства специальных размеров можно подавить феррорезонансные колебания.

Приложение В (справочное)

Схемы и основные принципы конструктивных решений антирезонансных ТН 6-35 кВ

В.1 НАМИ 10-35

ТН представляет собой два трансформатора (трехфазный и однофазный), расположенные в одном корпусе. Трехфазный трансформатор передает напряжение прямой и обратной последовательностей, а однофазный - только нулевой.

Однофазный трансформатор за счет большого количества витков обладает высокой характеристикой намагничивания и большим индуктивным сопротивлением. Антирезонансные свойства НАМИ обеспечиваются переносом нелинейности ТН в нулевую последовательность, где отсутствует ЭДС источника. Электрическая схема соединения обмоток представлена на рисунке В.1.

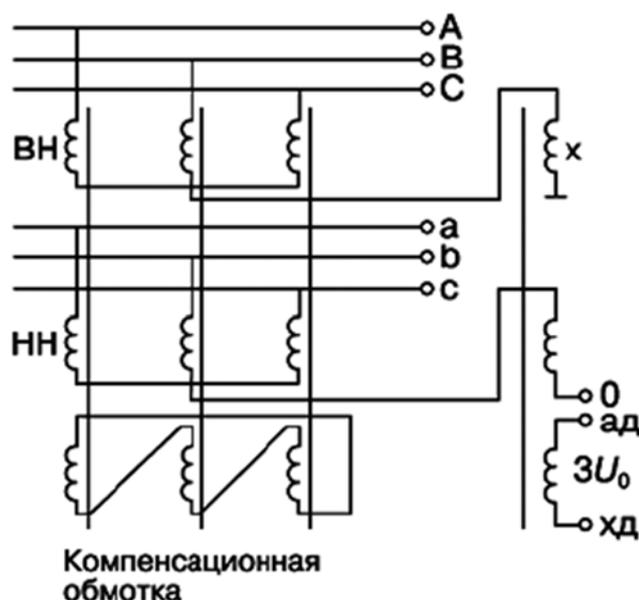


Рисунок В.1 - Электрическая схема ТН НАМИ 10-35

ТН НАМИ характеризуется:

- отсутствием гармонического феррорезонанса на частоте 50 Гц ("ложной земли") при работе на ненагруженных шинах;
- отсутствием субгармонического феррорезонанса с емкостями коротких линий на частоте 25; 16,6 и 10 Гц;
- отсутствием повреждений при работе в сети с ОЗЗ через перемежающуюся дугу;
- отсутствием повреждений при неполнофазных режимах работы сети с повышением напряжения одной из фаз до $3U_{н.раб.}$

В.2 ЗНОЛП-10

Электрическая схема трехфазной антирезонансной группы $3 \times$ ЗНОЛП-10 приведена на рисунке В.2.

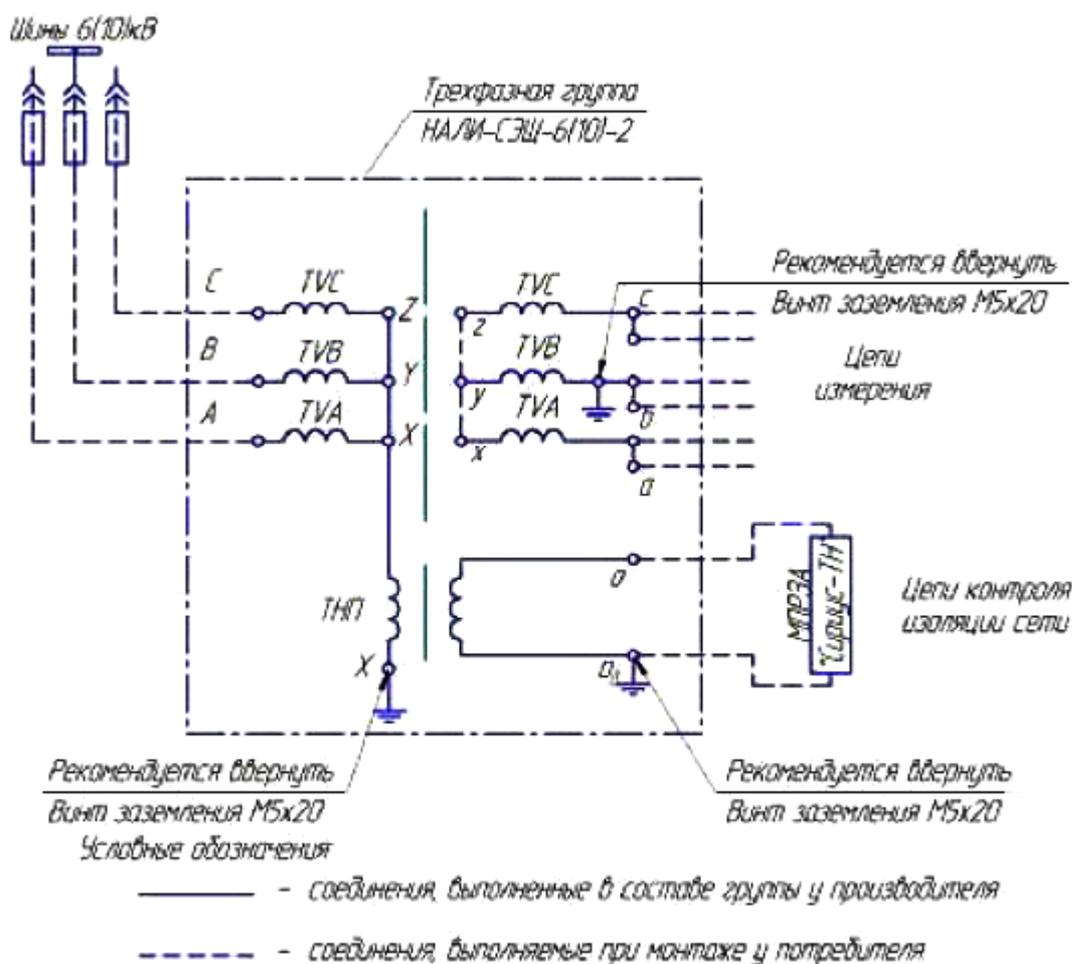


Рисунок В.3 - Принципиальная электрическая схема соединения обмоток ТН трехфазной антирезонансной группы

В.4 НАМИТ-10-2

Трансформатор представляет собой соединённые конструктивно в единое целое два трансформатора напряжения:

1. ТНКИ - трансформатор напряжения контроля изоляции, трёхобмоточный, первичные обмотки которого включены по схеме "звезда". Предназначен для питания цепей измерительных приборов учёта 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.

На рисунке В.4 представлена электрическая схема соединений ТН НАМИТ-10-2. Антирезонансные свойства достигаются введением в первичную цепь, связанную с землей, индуктивного сопротивления в виде трансформатора нулевой последовательности (ТНП) (рисунок В.4). Введение этого сопротивления выполняется путем дешунтирования его вторичной обмотки с помощью схемы РЗ (рисунок В.5). Недостаток этой схемы ТН является ненадежность работы РЗ. Второй недостаток - это "быстрое" насыщение стальных стержней отдельных фаз, что приводит к появлению "ложной зем-

ли".

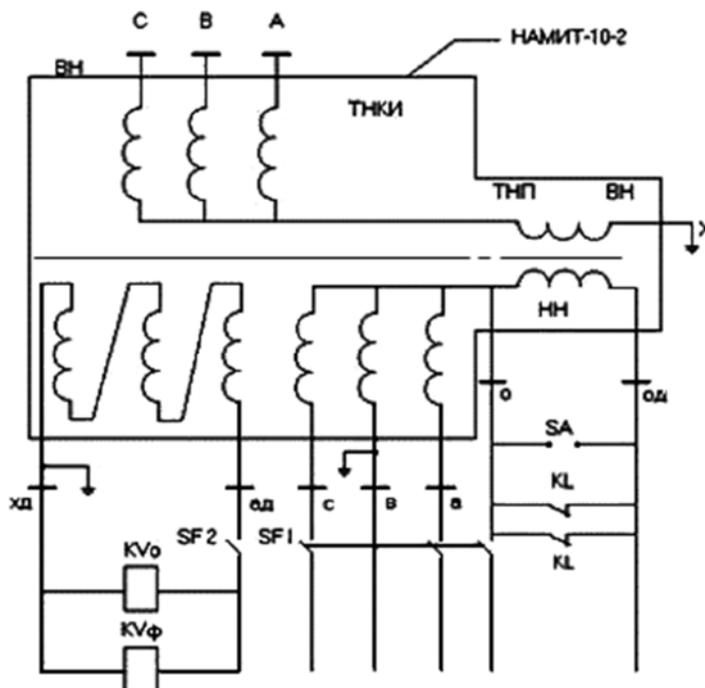


Рисунок В.4 - Схема соединений обмоток ТН

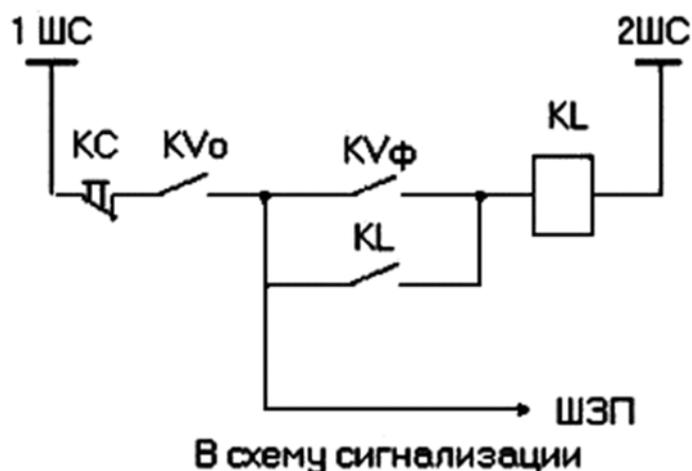


Рисунок В.5 - Схема оперативных цепей защиты от феррорезонансных процессов:
KVо-РН-53/60Д, Uср=20÷30 В; KVФ-РН-53/200, Uср=135÷140 В;

KL – промежуточное реле РП-25 или РП-23; KC – кнопка съема сигнала;
ШС – шины сигнализации; ШЗП – шина предупредительной сигнализации;
SA – переключатель режима работы ТНП

В.5. НАЛИ-НТЗ-6(10,35)

В.5.1 Трансформаторы состоят из трехфазного трехстержневого трансформатора прямой последовательности и однофазного двухстержневого трансформатора нулевой последовательности, выполнены в виде опорной конструкции. Корпус трансформаторов выполнен из эпоксидного компаунда, который одновременно является главной изоляцией и обеспечивает защиту обмоток от механических и климатических воздействий.

В.5.2 Антирезонансные свойства

Применение трансформаторов типа НАЛИ-НТЗ позволяет полностью исключить возникновение феррорезонанса при однократных дуговых замы-

каниях («*клевках земли*») и отключении металлических замыканий на землю - т.е. при основных видах воздействий, приводящих к возникновению феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью.

Горение перемежающейся дуги в большинстве случаев также не приведёт к повреждению трансформаторов, причём чем интенсивнее горит дуга (чем меньше интервал между зажиганиями/погасаниями) - тем безопаснее этот режим для трансформаторов.

Явление "*ложной земли*" не приводит к повреждению трансформаторов и вызывает лишь нарушение работы релейных схем и измерительных приборов, подключенных ко вторичной обмотке, предназначенной для измерения напряжения нулевой последовательности. Этот режим возможен только в сетях с очень маленькой ёмкостью фазы на землю (единицы нанофарад), и, следовательно, является маловероятным. В целом данный режим можно считать режимом феррорезонанса достаточно условно, это скорее свойство (особенность) сетей с малой ёмкостью фазы на землю, заземляемыми трансформаторами, и с какой-либо несимметрией. Наиболее выраженное явление "*ложной земли*" возникает при несимметрии сопротивления изоляции фаз. Ложный сигнал о замыкании на землю в таких сетях возникает практически во всех существующих в настоящее время конструкциях электромагнитных трансформаторов. При этом существует техническая возможность предотвратить или существенным образом демпфировать явление "*ложной земли*" в сетях с малой ёмкостью на землю и с трансформаторами типа НАЛИ-НТЗ за счёт дополнительного активного сопротивления, которое следует подключать к обмотке для измерения напряжения нулевой последовательности.

Возникновение неполнофазного режима работы силового трансформатора может приводить к возникновению на повреждённой фазе перенапряжений до $3,8U_{\max}$. Для традиционных трансформаторов такой режим является очень опасным, т.к. за счёт насыщения ток в их первичных обмотках в таком режиме может достигать единиц ампер. Трансформаторы типа НАЛИ-НТЗ не подвержены повреждениям в этом режиме благодаря значительно сниженной рабочей индукции трансформатора нулевой последовательности. Конструкция трансформатора нулевой последовательности позволяет выдержать трёхкратное повышение напряжения на первичной обмотке повреждённой фазы.

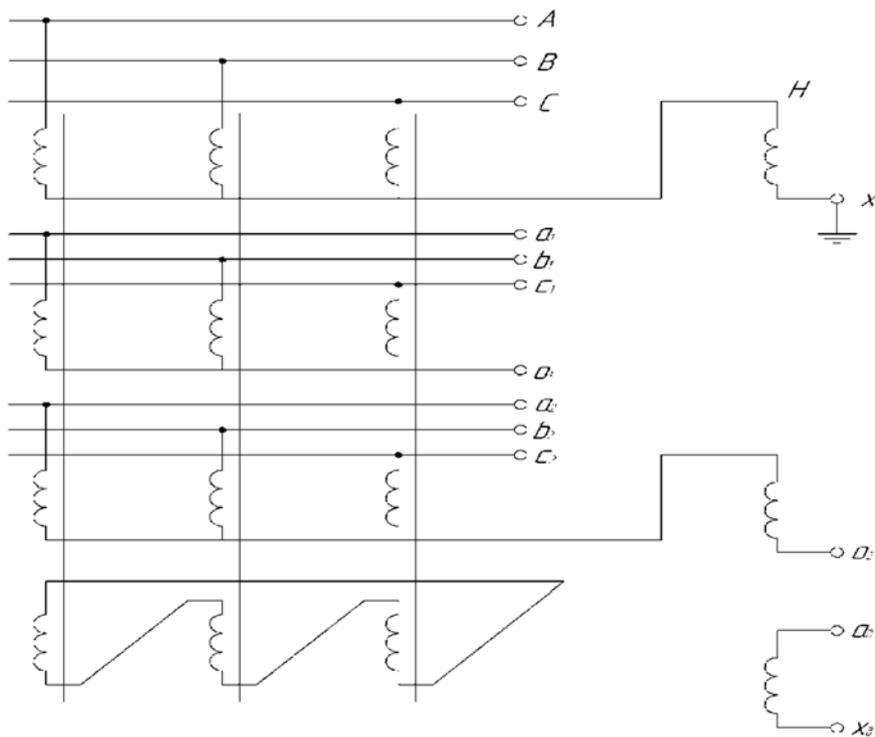


Рисунок В.4.1 - Схема электрическая принципиальная для трансформаторов НАЛИ-НТЗ-6(10,35) без предохранительных устройств

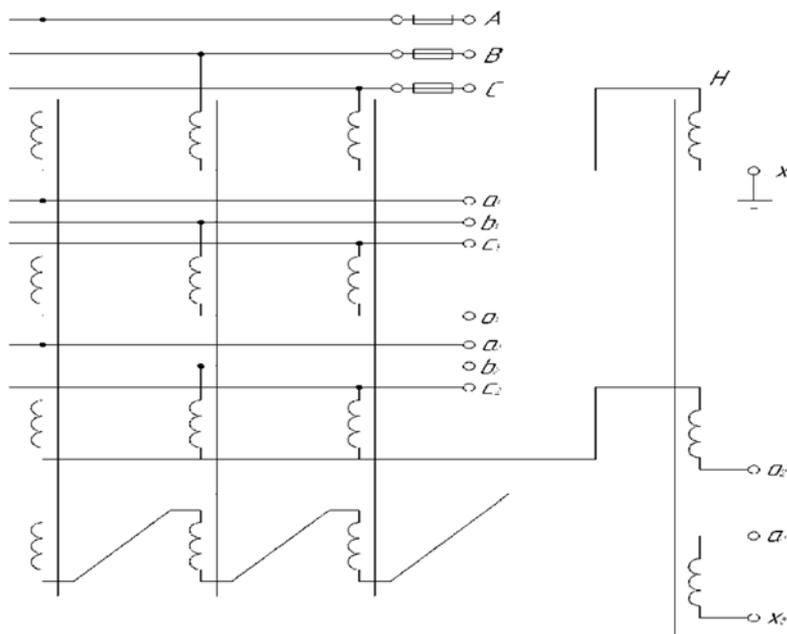


Рисунок В.4.2 - Схема электрическая принципиальная для трансформаторов НАЛИ-НТЗ-6(10,35) с предохранительными устройствами

Приложение Г
(справочное)

Методика исследования резонансных повышений напряжений на отключенной в цикле ОАПВ ВЛ с ШР

Г.1 Физику процесса и основные соотношения можно рассмотреть на упрощенной схеме замещения с сосредоточенными параметрами. Такая схема для электропередачи с отключенной фазой и ее преобразование показаны на рисунке Г.1[7].

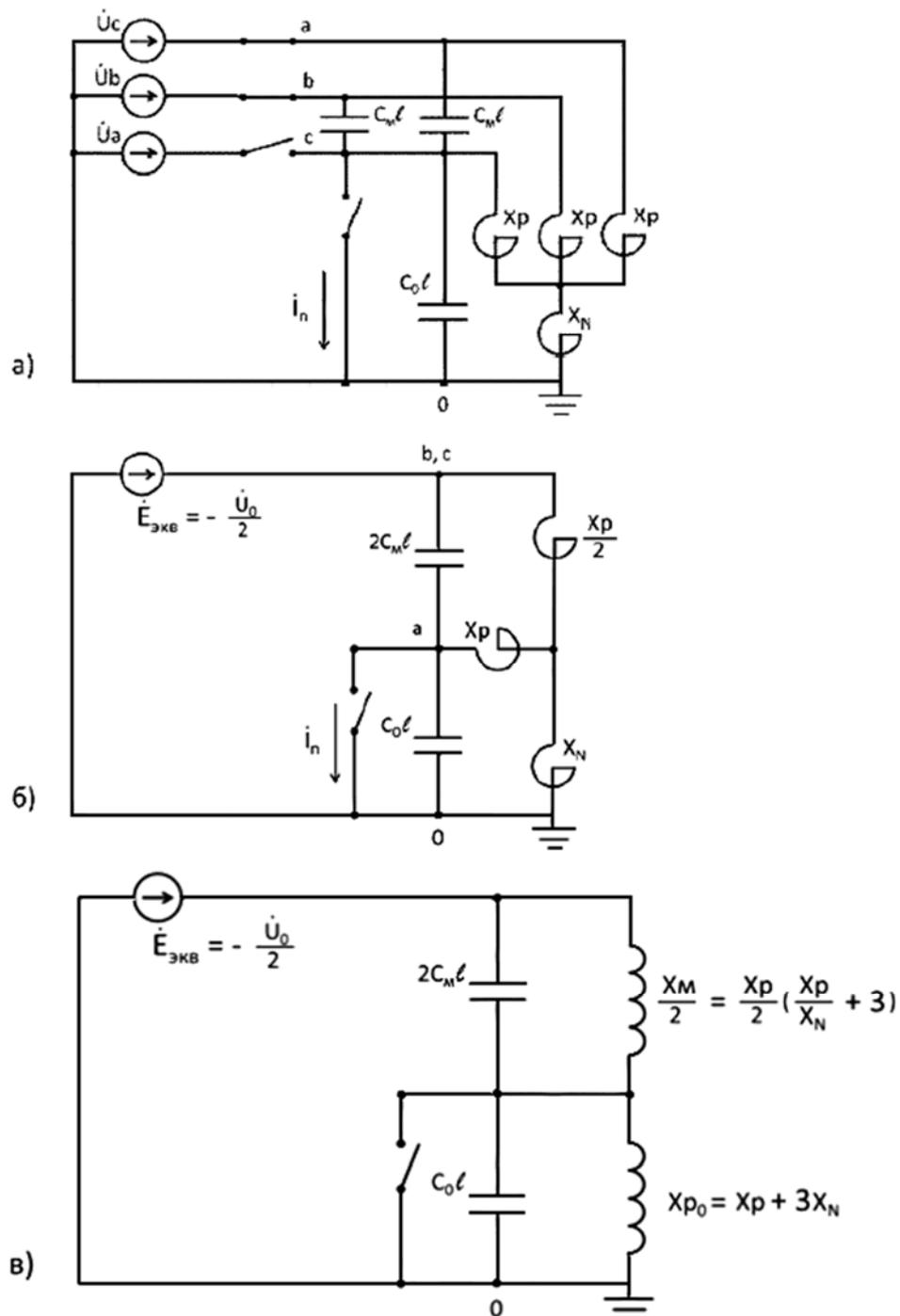


Рисунок Г.1 - Схема замещения электропередачи с отключенной фазой и ее преобразование
а) - исходная схема; б) - эквивалентная схема; в) - схема замещения.

При наличии в нейтрали ШР компенсационного реактора параллельно междуфазной емкости $2C_m l$ оказывается включенным индуктивное сопротивление $X_m / 2$ (рисунок Е.1 в)), которое компенсирует междуфазную емкость. Восстанавливающееся напряжение можно приближенно определить по формуле:

$$U_b = -U_a \cdot \frac{C_m}{C_0 + C_m} \cdot \frac{1 - K_p \frac{C_1}{C_m} \frac{X_N}{X_p + 3X_N}}{1 - K_p \frac{C_0 + 3C_m}{C_0 + 2C_m} \frac{X_p + 2X_N}{X_p + 3X_N}}, \quad (Г.1)$$

где C_1 , C_0 , C_m - погонные емкости линии соответственно по прямой и нулевой последовательности и между фазами, $n\Phi/m$;

l - длина линии, м;

X_p и X_N - индуктивные сопротивления ШР и КР, Ом;

$K_p = 1/X_p \cdot \omega C_1 l$ - степень компенсации шунтирующими реакторами емкости линии по прямой последовательности (рабочей емкости) $C_1 = C_0 + 3C_m$.

Полная компенсация наступает при:

$$X_m / 2 = 1/(2 \cdot \omega C_m l) \text{ т.е. при } X_N = X_p / (K_p \frac{C_1}{C_m} - 3). \quad (Г.2)$$

Г.2 В случае перекомпенсации емкости на землю сопротивление отключенной фазы относительно земли может иметь индуктивный характер и оказаться включенным (рисунок Г.1) последовательно с междуфазным емкостным сопротивлением, что приводит к резонансному повышению напряжения на отключенной фазе. Резонансу соответствует равенство нулю знаменателя выражения (Г.1). Отсюда определяется резонансная длина линии:

$$l_{рез} = \frac{1}{X_p \cdot \omega (C_0 + 2C_m)} \cdot \frac{X_p + 2X_N}{X_p + 3X_N}. \quad (Г.3)$$

Г.3 Точное определение напряжения на отключенной в цикле ОАПВ фазе следует определять расчетом с использованием программы расчета переходных процессов с учетом параметров ВЛ, числа ШР, наличия КР и его параметров.

Г.4 Схема подключения КР в нейтраль ШР приведена на рисунке Г.2.

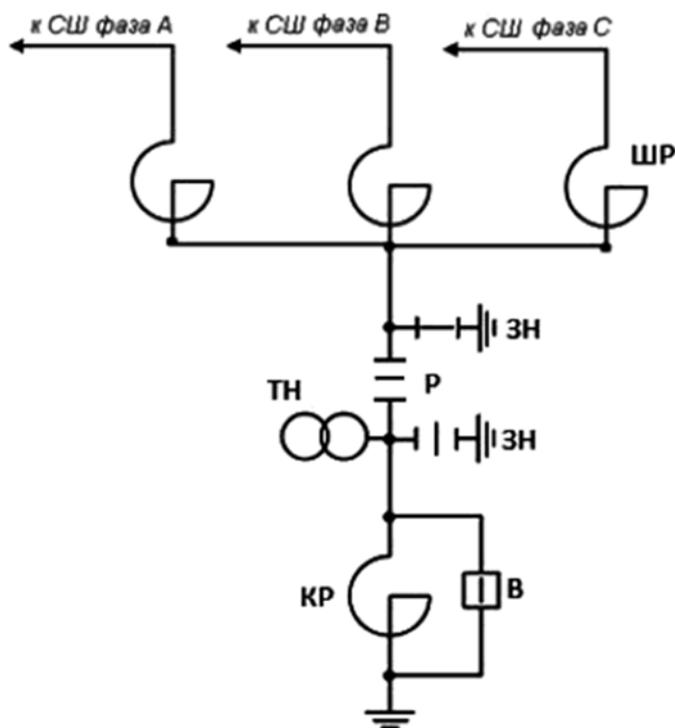


Рисунок Г.2 - Схема подключения КР
ШР - шунтирующий реактор; Р - разъединитель;
ТН - трансформатор напряжения; ЗН - заземляющий нож;
КР - компенсационный реактор; В –выключатель

При выборе реактивного сопротивления КР необходимо определить напряжение 50 Гц на нейтрали ШР в режимах горения и погасания дуги, которое не должно превышать допустимого значения. Для отечественных ШР 750 кВ класс изоляции нейтрали ШР составляет 35 кВ, для которого ГОСТ 1516.3_ нормирует наибольшее рабочее напряжение 40,5 кВ и одноминутное испытательное напряжение нейтрали 85 кВ.

Приложение Д
(справочное)

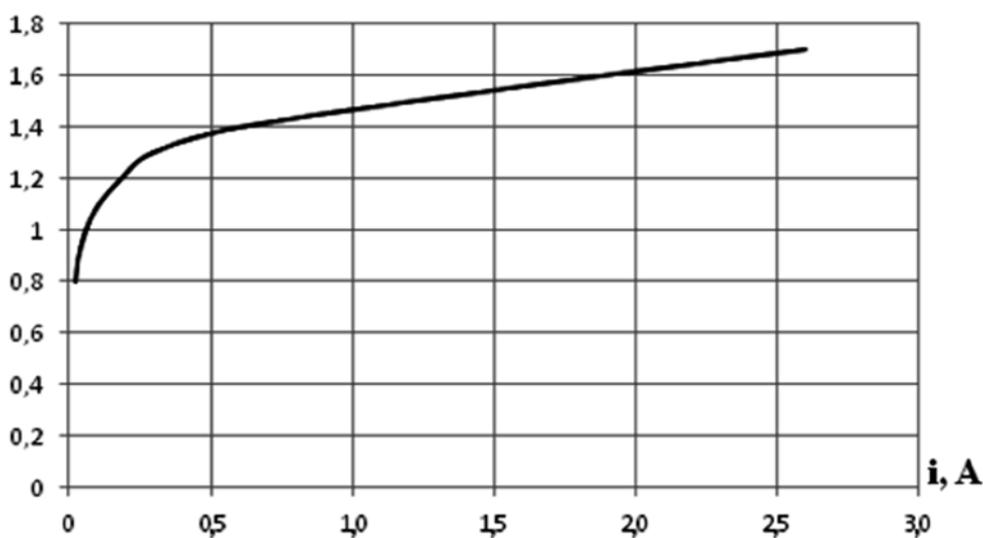
Основные параметры схемы замещения ТН типов НКФ-220 и НКФ-500

Основные параметры НКФ-220 и НКФ-500 для расчета феррорезонансных перенапряжений по рисунку Г.1 [R , $\Psi(i)$] получены по непосредственным сетевым измерениям [8].

Таблица Д.1 - Параметры расчетной схемы по рисунку 5.7

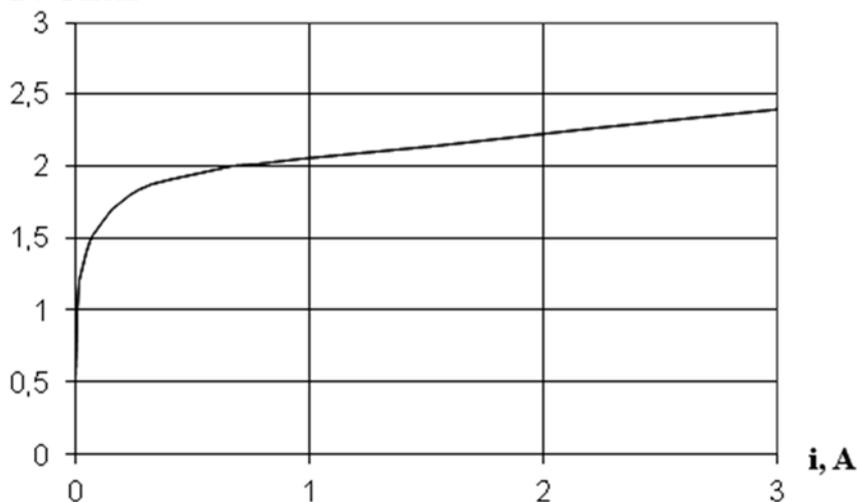
Тип ТН	Сопротивление первичной обмотки ТН, R_1 , Ом	Номинальный поток, Вб
НКФ-220	9400	580
НКФ-500	6675	1295

$\Psi / \Psi_{ном}$



а)

$\Psi / \Psi_{ном}$



б)

**Рисунок Д.1 - Характеристики намагничивания:
а) НКФ-220, б) НКФ-500**

Приложение Е
(справочное)

Емкости конденсаторов, шунтирующих контакты выключателей

Таблица Е.1 - Емкости конденсаторов, шунтирующих контакты выключателей

Тип выключателя	Емкость конденсатора, шунтирующая контакты полюса, пФ
ВВН-150	330
ВВШ-150	330
ВВН-220-10	250
ВВН-220-15	250
ВВШ-220	250
ВВБ-220-12	825
ВВБ-220Б-40/2000	825
ВВД-220	825
ВНВ-220	700
ВЭК-220	250
ВМТ-220Б	550
ВВН-330-15	167
ВВН-330	303
ВВДМ-330	4130
ВВ-330Б	167
ВВБ-500	288
ВВБ-500-30	275
ВВ-500Б	550
ВНВ-500	350
ВПБ-500	335
GL 317 GL 317X	600
GL 318 GL 318X	300 (750 кВ)

Библиография

- [1] Правила устройства электроустановок. Издание шестое Энергоатомиздат, переработанное и дополненное, 1986.
- [2] Поляков В.С. Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными измерительными трансформаторами напряжения. Энергоэксперт №1-2014.
- [3] Зилес Л.Д. Параметры и области существования феррорезонанса 50 Гц трансформаторов напряжения 110—500 кВ. «Электричество» № 6-2014
- [4] Стандарт организации НП «ИНВЕЛ», Российская Федерация
СТО 34.01-21.1-001-2017 Распределительные электрические сети напряжением 0,4-110 кВ. Требования к технологическому проектированию
- [5] Стандарт организации ПАО «Россети», Российская Федерация
СТО 70238424.29.240.10.009-2011 Распределительные электрические сети. Подстанции 6-20/0,4 кВ. Условия создания. Нормы и требования
- [6] Стандарт организации РАО «ФСК ЕЭС», Россия
Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. Утверждено Департаментом электрических сетей РАО "ЕЭС России" 14.04.95 г. Дата введения 1998-07-01
- [7] Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», Россия
СТО 56947007-29.240.01.221-2016 Руководство по защите электрических сетей напряжения 110-750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. Дата введения: 2016-05-16
- [8] Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», Россия
СТО 56947007-29.240.10.191-2014 Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6-750 кВ. Дата введения: 2014-11-19
- [9] Калантаров Н.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. Справочная книга, 3-е изд., перераб. и доп. Л.; Энергоатомиздат.1966, с. 288
- [10] Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», Россия
СТО 56947007-29.130.10.090-2011 Типовые технические требования к комплектным распределительным устройствам с элегазовой изоляцией (КРУЭ) классов напряжения 110-500 кВ, ОАО "ФСК ЕЭС".
- [11] Национальный стандарт Российской Федерации
ГОСТ Р 52725-2007 Ограничители перенапряжения нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия
- [12] Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», Россия
СТО 56947007-29.120.50076-2011 Типовые технические требования к ограничителям перенапряжения классов напряжения 6-750 кВ

- [13] Игнатенко Е.И. Способы защиты трансформаторов напряжения от феррорезонанса. Газета "Энергетика и промышленность России" \№ 9-10 (413-414) май 2021 года
- [14] СТБ PD IEC TR 61869-102-2014 Измерительные трансформаторы. Феррорезонансные колебания на подстанциях с индуктивными трансформаторами напряжения. СТБ PD IEC TR 61869-102-2014 Instrument Transformers - Ferroresonance oscillations in substations associated with inductive voltage transformers.
- [15] Руководство пользователя по применению комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ) на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше* User guide for the application of gas-insulated switchgear (GIS) for rated voltages of 72.5 kV and above. CE/SC 23 GT/WG 10.03, 1998, 83 pp. Ref. No. 125 CIGRE WG 23-10
- [16] Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. ПНСТ 319— 2018. Трансформаторы измерительные. Часть 3. Технические условия на индуктивные трансформаторы напряжения.