

На правах рукописи

Селиванов Василий Николаевич

Исследование феррорезонансных колебаний в воздушных сетях 35 кВ с изолированной нейтралью с электромагнитными трансформаторами напряжения

Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2004

Работа выполнена в институте физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской Академии наук

Научный руководитель: доктор технических наук
Ефимов Борис Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Халилов Фирудин Халилович
кандидат технических наук, доцент
Веселов Анатолий Евгеньевич

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
«Колэнерго» РАО ЕЭС России

Защита состоится «_____» _____ 2004 г. в _____ часов в ауд. _____
на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет» по адресу:
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В новых экономико-политических условиях одной из актуальнейших проблем является энергетическая безопасность России. Моральный и физический износ электротехнического оборудования, а также отсутствие достаточных финансовых средств для обновления и восстановления оборудования ведут к увеличению аварий в энергосистемах и снижению качества электроснабжения. Поэтому задача сохранения технического уровня и обеспечения надежности систем передач электроэнергии носит не только прикладной, но и стратегический характер в плане обеспечения энергетической безопасности России.

Причиной многочисленных аварий в высоковольтных сетях являются различного рода перенапряжения. В данной работе рассматриваются явления, связанные с феррорезонансными колебаниями в сетях среднего класса напряжений (СН).

Феррорезонанс - сложное нелинейное электрическое явление, которое до сих пор является причиной высокой аварийности в сетях СН и проблема защиты от такого воздействия до сих пор остается окончательно не решенной. Это явление чрезвычайно опасно для энергосистем и промышленных предприятий, так как приводит к возникновению перенапряжений и сверхтоков, недопустимых для оборудования. К феррорезонансу относят колебательные процессы, возникающие в электрических цепях, содержащих, по крайней мере, одну нелинейную индуктивность, линейную емкость и один или несколько источников синусоидального напряжения. Нелинейной индуктивностью может быть силовой трансформатор, реактор или электромагнитный трансформатор напряжения. Источником напряжения является трехфазная сеть переменного тока с глухозаземленной, либо с изолированной нейтралью. Режим заземления нейтрали и различные конфигурации сетей являются причиной достаточно широкого многообразия типов феррорезонансных контуров, которые различаются как строением емкостной компоненты, так и числом фаз эквивалентного источника.

В данной работе рассмотрен феррорезонанс в трехфазных сетях с изолированной нейтралью на примере сети 35 кВ, приводящий к выходу из строя трансформаторов напряжения типа ЗНОМ - 35.

Недостаточная изученность феррорезонансных процессов (ФРП), как нелинейного явления в теории трехфазных электрических цепей, а также потребность в

создании эффективных средств защиты электротехнического оборудования от феррорезонансных перенапряжений и сверхтоков определяют актуальность работы.

Работа выполнялась в рамках плановой работы Института физико-технических проблем энергетики Кольского научного центра РАН «Разработка стратегии сохранения технического уровня и обеспечения надежности систем передачи электроэнергии в меняющихся технико-экономических условиях Севера страны» (№ гос.регистрации 01990002845), а также ряда хоздоговорных работ с АО «Колэнерго».

Цель работы. Развитие теории феррорезонансных процессов в разветвленных трехфазных сетях среднего класса напряжений с изолированной нейтралью с электромагнитными трансформаторами напряжения, разработка математической модели и программных средств для расчета этих явлений, теоретическое и экспериментальное исследование феррорезонанса в широком диапазоне изменения параметров сети, составление рекомендаций по мероприятиям, позволяющим снизить аварийность из-за феррорезонансных явлений.

Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна работы.

1. Разработана математическая модель и методика численного расчета феррорезонансных колебаний в разветвленных трехфазных сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения, на основе которой построены и проанализированы области существования феррорезонансных колебаний с различными частотами;

2. Разработан метод сравнительного анализа эффективности различных методов защиты электрических сетей от ФРП посредством ортогонализации нелинейных уравнений феррорезонансных колебаний в трехфазной сети путем разложения на α -, β -, 0 – координаты;

3. Предложен эффективный способ защиты разветвленной сети с изолированной нейтралью с несколькими комплектами ТН, позволяющий осуществлять подавление ФРП при установке устройств защиты только на одном комплекте ТН выделенного участка сети.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются применением достаточно полных математических моделей исследуемых процессов, представительным объемом теоретических и экспериментальных исследований, а также удовлетворительным согласием результатов расчетов с результатами экспериментальных данных.

Практическое значение работы.

1. Разработанное программное обеспечение позволяет определять условия возникновения феррорезонанса при различных видах коммутаций, включая аварийные, проводить численный расчет феррорезонансных колебаний в разветвленных трехфазных сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения и определять оптимальные способы предотвращения феррорезонанса.

2. Показано, что эффективным средством защиты трансформаторов напряжения является установка последовательно с его высоковольтной обмоткой активных сопротивлений, эффективно подавляющих ФРП и практически не влияющих на функционирование как всей сети в целом, так и ТН, установленных в цепях защиты, автоматики и учета энергии.

4. Предложена конструкция резистивных устройств наружного исполнения для установки в защищаемые участки разветвленных воздушных сетей.

Реализация результатов работы. На основе разработанных методов расчетов и результатов проведенных исследований феррорезонансных явлений в электрических сетях были подготовлены и внедрены рекомендации по защите участков разветвленных сетей 35 кВ ОАО «Колэнерго».

Разработанные резистивные устройства защиты трансформаторов напряжения ЗНОМ-35 от ФРП наружного исполнения уставлены в сетях с изолированной нейтралью СЭС «Колэнерго», где в течение 7 лет выдержали успешные испытания в условиях Крайнего Севера. На основе результатов проведенной работы в настоящее время в ОАО «Колэнерго» принято решение об установке таких резисторов на оставшихся без защиты участках сетей 35 кВ, подверженных феррорезонансам.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-техническом совете в ОАО «Колэнерго» в 1999 г., на третьей международной конференции «Дифференциальные уравнения и их применение DIFFEQ 2000» (Санкт-Петербург, 12-17 июня 2000 г.), на научных семинарах ИФТПЭС КНЦ РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, включает 178 страниц основного текста, 63 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 71 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы подходы к решению проблемы.

В главе 1 проведен анализ проблемы возникновения и развития феррорезонансных колебаний в электрических сетях. Рассмотрена физическая сущность явления, введена классификация возможных феррорезонансных схем, проведен анализ существующих методик исследования феррорезонансных схем в сетях 6-35 кВ. Сформулированы цель диссертационной работы и подходы к решению проблемы.

Главной особенностью рассматриваемого явления является возможность возникновения нескольких устойчивых состояний при одном и том же наборе параметров цепи. Феррорезонанс может быть вызван переходными процессами, являющимися следствием грозových и внутренних перенапряжений, коммутаций трансформаторов или нагрузки, возникновения или устранения короткого замыкания и т.д. Анализ работ, посвященных проблеме феррорезонансных перенапряжений показал, что многие авторы рассматривают данный вопрос исключительно в рамках классической теории электрических цепей. Однако попытки линеаризации существенно нелинейной задачи приводят к искажению физической картины явления и потере принципиально значимых данных. В данной работе автор отказался от попыток получения аналитических решений, ограничившись численным расчетом модельной системы уравнений. Анализ и исследование всех феррорезонансных схем с использованием какой-либо единой методики не представляется возможным, так как существуют большие различия в характере проявления феррорезонансных явлений, конфигурации электрических схем, составе и характеристиках участвующего в них оборудования. В данной работе основное внимание уделено изучению феррорезонансных процессов, возникающих в разветвленных сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения.

В настоящее время отсутствует единый подход к защите сетей от феррорезонанса. Для подавления феррорезонансных перенапряжений предложены различные

средства защиты, каждое из которых имеет свои достоинства и недостатки, а также свою область применения.

Перечисленные вопросы позволили сформулировать основные задачи работы:

- исследование феррорезонансных колебаний как нелинейного явления в трехфазных электрических цепях;
- определение конфигураций и параметров электрических сетей, в которых возможно возникновение феррорезонансных колебаний;
- уточнение математической модели трехфазной сети с изолированной нейтралью с электромагнитными трансформаторами напряжения;
- разработка программных средств для исследования реальных электрических сетей на предмет возможности возникновения феррорезонансных колебаний и определения оптимальных способов предотвращения феррорезонанса;
- разработка технических средств для предотвращения феррорезонансных колебаний;
- экспериментальная проверка разработанных технических средств.

Во второй главе предложен метод анализа феррорезонансных процессов в сетях с нелинейными индуктивностями, сформулированы общие допущения при моделировании феррорезонансных схем, осуществлен выбор методов численного интегрирования, описана программа для анализа разветвленных сетей 35 кВ на возможность возникновения феррорезонанса. В данной работе для расчета феррорезонансных схем используется метод, основанный на составлении уравнений цепи с использованием аналитической аппроксимации нелинейных характеристик намагничивания трансформаторов и их решении методами численного интегрирования. В качестве метода численного интегрирования феррорезонансных схем выбран метод Гира четвертого порядка. Для анализа реальных сетей 35 кВ на возможность возникновения феррорезонанса была разработана программа на алгоритмическом языке Фортран. В программе моделируются явления в участке сети наиболее общего вида, эквивалентная схема которого представлена на рис.1. На этом рисунке показана схема замещения участка сети с несколькими комплектами ТН. Все ТН разбиты на две группы, в каждую из которых могут входить один или несколько комплектов ТН. В первую группу (ТН1) входят ТН релейной защиты,

для которых допускается установка демпфирующих сопротивлений $R_{\text{ДМ}}$. Вторая группа (ТН2) предназначена для измерений, поэтому установка демпфирующих сопротивлений не рекомендуется. Кроме демпфирующих сопротивлений на схеме указаны сопротивления в нейтрали сети R_N и сопротивления $R_{\text{ДОБ}}$, включаемые в разомкнутый треугольник дополнительных обмоток НН ТН.

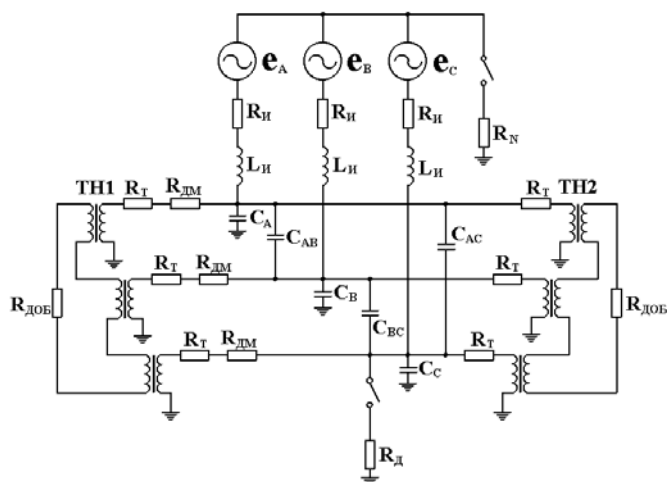


Рис.1. Эквивалентная схема участка сети.

конкретном участке сети 35 кВ с заданными параметрами, оценить эффективность различных защитных мероприятий и выбрать оптимальное решение, а также параметры защитных устройств.

В третьей главе уточнена математическая модель трансформатора напряжения ЗНОМ-35 на основе данных о его конструкции и схем включения, проанализированы способы аппроксимации кривой намагничивания.

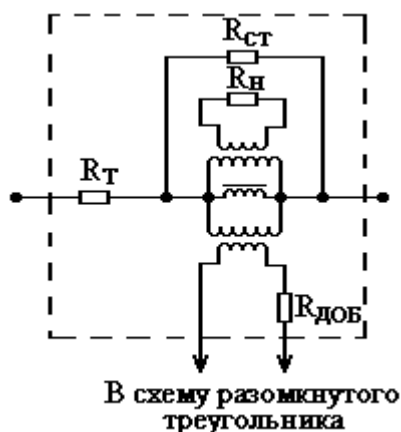


Рис. 2. Схема замещения трансформатора напряжения

Схема замещения силового трансформатора состоит из трехфазного симметричного синусоидального источника напряжения, линейной индуктивности $L_{\text{И}}$ и активного сопротивления $R_{\text{И}}$ питающей обмотки. Разработанные методика и программа расчета позволяют определить условия возникновения ферро-резонансных перенапряжений на

Наиболее простой является модель, представленная на рис.2. Трансформатор замещается последовательно включенным резистором R_T , который соответствует активным потерям в первичной обмотке трансформатора, и нелинейной индуктивностью, представленной зависимостью между током в первичной обмотке i и потоком сцепления Ψ . Резистор $R_{\text{СТ}}$ соответствует потерям в стали сердечника, $R_{\text{Н}}$ - сопротивление нагрузки в основной вто-

ричной обмотке, $R_{\text{доб}}$ - сопротивление, включаемое в разомкнутый треугольник дополнительных вторичных обмоток комплекта ТН. Зависимость $\Psi(i)$ или $i(\Psi)$ представляется либо в виде таблицы значений, либо в виде степенного полинома, наиболее близко аппроксимирующего табличные значения.

Для использования модели трансформатора при расчете феррорезонансных явлений необходимо знать зависимость магнитного потока от протекающего в первичной обмотке тока, которая входит в дифференциальные уравнения системы. Эта зависимость может быть получена либо из кривой намагничивания $B(H)$ для стали магнитопровода трансформатора, либо экспериментальным путем. В данной работе на основе конструкционных и паспортных параметров ТН типа ЗНОМ-35-65 и результатов экспериментального исследования его характеристик получены значения величин, входящих в схему замещения трансформатора (рис.2), а также предложены различные варианты аппроксимации кривой намагничивания. Для модельных расчетов ФРП в сетях использовались полиномиальная аппроксимация вида $i(\Psi) = a_1\Psi + a_5\Psi^5$,

где $a_1 = 1.38 \cdot 10^{-5}$ А/Вб, $a_5 = 1.8 \cdot 10^{-13}$ А/Вб⁵,

и логарифмическая аппроксимация

$$i(\Psi) = g_s \Psi + \frac{\sqrt{2}}{8k} (g_\mu - g_s) \left\{ \ln \left(\frac{(k\Psi)^2 + \sqrt{2}k\Psi + 1}{(k\Psi)^2 - \sqrt{2}k\Psi + 1} \right) + 2 \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{2}k\Psi}{1 - (k\Psi)^2} \right) \right\},$$

где $k = 0.003$ Вб⁻¹, $g_s = \frac{1}{L_s} = \frac{1}{70}$ Гн⁻¹, $g_\mu = \frac{1}{L_\mu} = \frac{1}{70000}$ Гн⁻¹.

В четвертой главе проведено численное исследование областей существования устойчивых феррорезонансных колебаний в широком диапазоне изменения напряжения источника и эквивалентной емкости сети.

Численное определение границ и структуры областей существования устойчивых решений систем нелинейных дифференциальных уравнений, выполнялось перебором независимых переменных в широком диапазоне их изменения с шагами, достаточными для выявления основных особенностей явлений. Расчеты проводились для простейшей схемы замещения (рис.3), содержащей три источника э.д.с., три нелинейные индуктивности, четыре постоянных сопротивления и одну постоянную емкость.

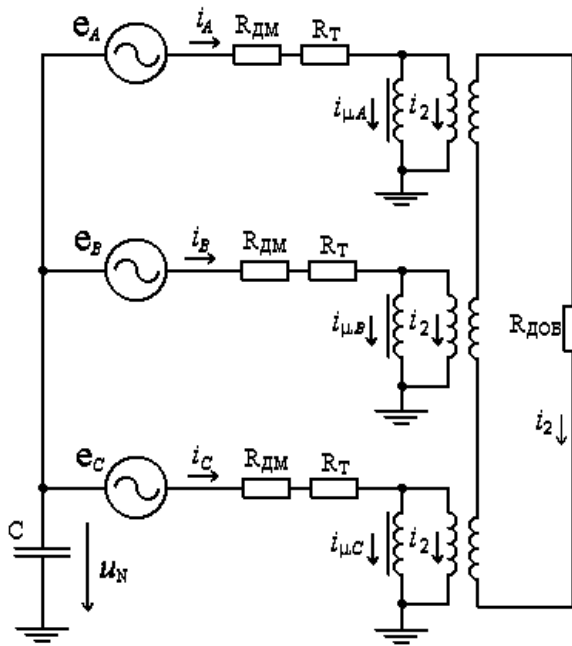


Рис. 3. Схема замещения участка сети.

Несмотря на простоту данной схемы, она позволила выявить все характерные особенности, присущие феррорезонансным контурам и с достаточной точностью определить области существования различных феррорезонансных режимов (рис.4.). На этом рисунке показаны области, полученные в результате многовариантных расчетов в широком диапазоне изменения емкости и линейного напряжения сети, значительно превышающем номинальные параметры, что сделано для более

подробного изучения физики явления.

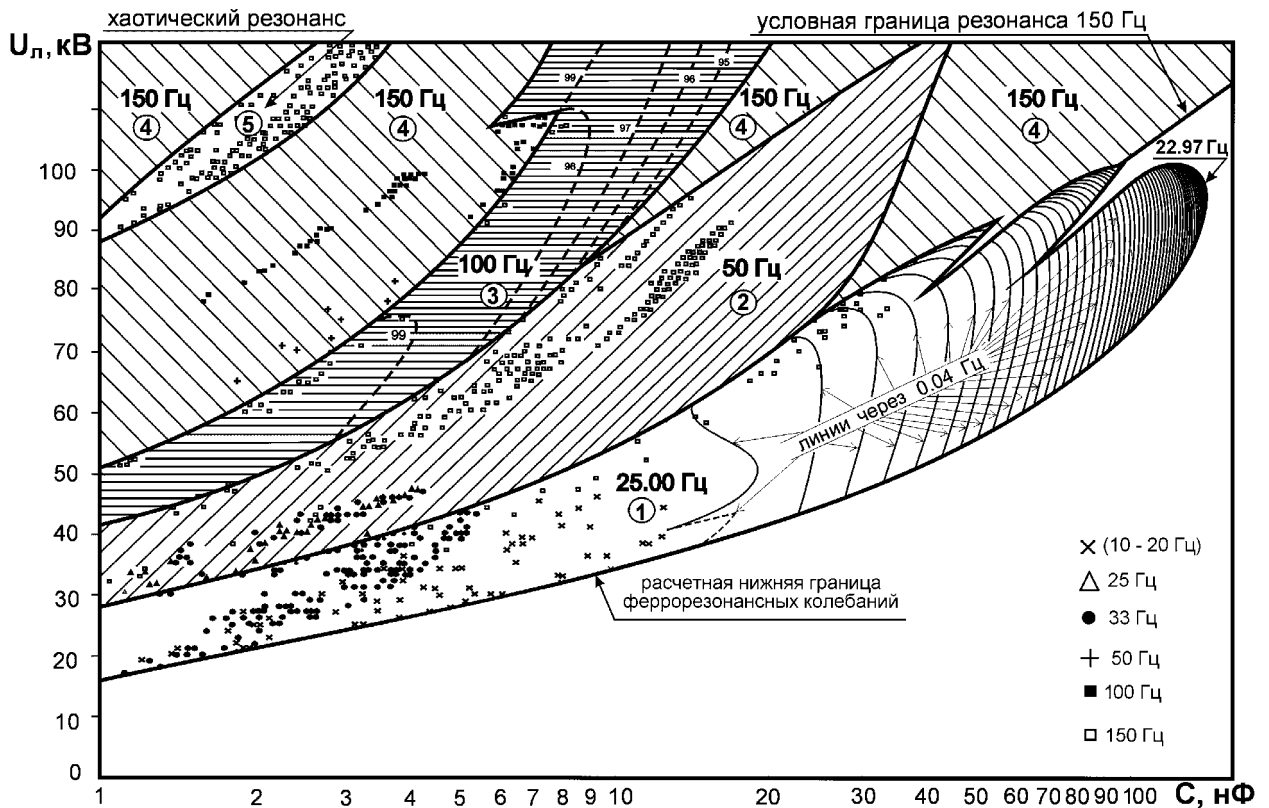


Рис. 4. Резонансная область: зависимость преобладающей частоты колебаний от емкости и линейного напряжения сети.

Расчеты показали, что при напряжении сети, близком к номинальному, устойчивый феррорезонанс возможен при изменении емкости в схеме замещения от 1 нФ до 100 нФ. Это дает диапазон изменения суммарной длины линий от 200 м до 20 км. Нижний предел практически соответствует вступлению в резонанс емкости оборудования с шинами подстанций. При длинах более 20 – 40 км феррорезонанс оказывается невозможным при любом напряжении сети 35 кВ даже с учетом перенапряжений.

До напряжения 15 кВ ФРП не наблюдаются ни при каком значении ёмкости. При дальнейшем повышении напряжения до 16 кВ возникает ФРП на частоте 25 Гц при значениях $C = 1000$ пФ.

Нижняя граница области устойчивого ФРП на частоте 25 Гц определяет границу появления феррорезонансных явлений. Но по мере возрастания C частота ФРП медленно снижается от 25 до 23 Гц. Максимальное значение C , при котором существует ФРП на частоте близкой к 25 Гц, равняется 110000 пФ, при этом напряжение равняется 100 кВ.

Показано, что для сетей с изолированной нейтралью независимо от длины линии основную опасность представляют феррорезонансные колебания на частоте 25 Гц или близких к ней. Нижняя граница существования устойчивых колебаний на этой частоте определяет нижнюю границу всей резонансной области, поэтому оценки возможности появления ФРП только на частоте 50 Гц занижают степень опасности реальных процессов.

В пятой главе проведен сравнительный анализ эффективности различных методов защиты электрических сетей от ФРП. Для анализа эффективности средств защиты электрических сетей от ФРП применен метод ортогонализации нелинейных уравнений феррорезонансных колебаний в трехфазной сети путем разложения на $\alpha, \beta, 0$ – координаты. Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью не имеет однофазного представления в фазных переменных, а дифференциальные уравнения для каждой из фаз содержат токи и напряжения всех фаз. Для преобразования трехфазной схемы в систему однофазных контуров, описываемых уравнениями с неполным набором переменных, предложено использовать $\alpha, \beta, 0$ – переменные.

Преобразование фазных переменных в $\alpha, \beta, 0$ – переменные отвечает переходу от косоугольной системы осей фаз к ортогональной системе осей α и β . В 0-переменных описываются параметры контура нулевой последовательности и данное обстоятельство позволяет исследовать феррорезонансные явления в $\alpha, \beta, 0$ – переменных, не производя обратных преобразований, так как именно в контуре нулевой последовательности протекают интересующие нас явления.

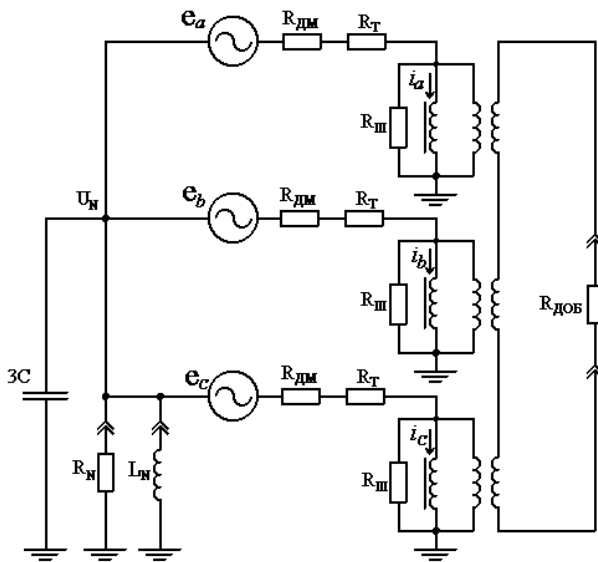


Рис.5. Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью.

Исходной эквивалентной схемой для построения модели является участок трехфазной сети с изолированной нейтралью простейшей конфигурации (рис 5). Максимальное упрощение схемы необходимо для уменьшения числа параметров, влияющих на поведение системы. В настоящее время наиболее эффективным средством подавления феррорезонанса считается установка в сети дугогасящего реактора L_N или высокоомной нейтральной точки. Такое заземление нейтрали образует путь для разряда фазных емкостей, поэтому практически исключаются перенапряжения при однофазных дуговых замыканиях на землю, а также значительно уменьшается вероятность возникновения и развития феррорезонансных процессов.

В данной работе показана возможность подавления феррорезонанса включением высокоомного сопротивления в первичную обмотку ТН с высокой стороны и определены границы применения такого мероприятия.

Подстановка $\alpha, \beta, 0$ – представления токов, напряжений и потоков позволяет описать процессы в схеме на рисунке 5 системой дифференциальных уравнений в $\alpha, \beta, 0$ – переменных

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}}{R_{\text{ш}}}\right) \frac{d\Psi_{\alpha}}{dt} &= e_{\alpha} - (R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}) i_{\alpha}; \\ \left(1 + \frac{R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}}{R_{\text{ш}}}\right) \frac{d\Psi_{\beta}}{dt} &= e_{\beta} - (R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}) i_{\beta}; \\ \left(1 + \frac{R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}}{R_{\text{ш}}} + 3 \frac{R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}}{R_{\text{д}}}\right) \frac{d\Psi_0}{dt} &= e_0 - (R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}) i_0 - U_N; \\ C \frac{dU_N}{dt} &= \left(\frac{1}{R_{\text{ш}}} + \frac{3}{R_{\text{ДОБ}}}\right) \frac{d\Psi_0}{dt} + i_0. \end{aligned}$$

В системе уравнений, описывающей схему с резистивным заземлением нейтрали последние два уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{(R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}})}{R_{\text{ш}}}\right) \frac{d\Psi_0}{dt} &= e_0 - (R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}) i_0 - U_N; \\ C \frac{dU_N}{dt} &= \frac{1}{R_{\text{ш}}} \frac{d\Psi_0}{dt} - \frac{U_N}{3R_N} + i_0. \end{aligned}$$

При анализе защиты с использованием дугогасящего реактора L_N необходимо использовать уравнения

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{(R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}})}{R_{\text{ш}}}\right) \frac{d\Psi_0}{dt} &= e_0 - (R_{\text{TH}} + R_{\text{DM}}) i_0 - U_N; \\ C \frac{dU_N}{dt} &= \frac{1}{R_{\text{ш}}} \frac{d\Psi_0}{dt} - \frac{1}{3L_N} \int U_N dt + i_0. \end{aligned}$$

Полученные уравнения описывают поведение трех зависимых контуров $\alpha, \beta, 0$ – компонент (рис. 6.) При определенных условиях энергия из контуров α и β может передаваться в 0 – контур и поддерживать в нем незатухающие феррорезонансные колебания.

Демпфирующее сопротивление $R_{\text{ДОБ}}/3$ присутствует только в 0 – контуре и включено параллельно шунтирующему сопротивлению $R_{\text{ш}}$ и индуктивности намагничивания нулевой последовательности. Несомненно, использование дополнительных обмоток для устранения опасности феррорезонанса было бы наиболее разумным решением. В нормальном режиме сопротивление $R_{\text{ДОБ}}$ практически не нагружает трансформатор напряжения, а в аварийном режиме вносит дополнительное затухание в контур нулевой последовательности. В настоящее время практически все трансформаторы напряжения на феррорезонансноопасных участках сетей ос-

нащены демпфирующими сопротивлениями во вторичных дополнительных обмотках, однако, как показано в работе, не всегда эта защита оказывается эффективной.

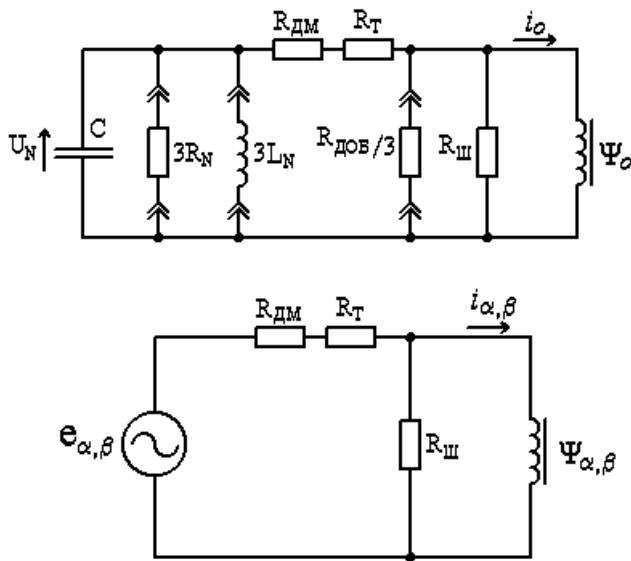


Рис.6 $\alpha, \beta, 0$ – контуры трехфазной сети с изолированной нейтралью

Влияние элементов L_N и R_N основано на том же принципе: остаточные заряды стекают с нейтрали сети в контур заземления, что устраняет причину феррорезонанса – появление в сердечниках трансформаторов постоянной составляющей потока.

Совершенно иной механизм подавления феррорезонансных колебаний осуществляется при включении высокоомного резистора последовательно с высоковольтной обмоткой трансформатора

напряжения. Сопротивление добавочного резистора образует с активным сопротивлением и индуктивностью трансформатора напряжения делитель. При нормальном режиме работы индуктивность трансформатора огромна и падение напряжения на добавочном резисторе составляет единицы процентов. При увеличении напряжения в сети в аварийном режиме магнитопровод трансформатора насыщается, ток через обмотку возрастает, но одновременно увеличивается и падение напряжения на добавочном резисторе, что ограничивает дальнейшее развитие резонансных процессов.

Основной причиной, ограничивающей применение данного типа защиты, является большая дополнительная погрешность, вносимая защитными резисторами. В зависимости от нагрузки измерительных обмоток трансформатора напряжения и величины защитного сопротивления, дополнительная погрешность по напряжению составляет от 0,5 до 5,0 %, а дополнительная угловая погрешность от 10 до 100 мин. Такое увеличение погрешности совершенно недопустимо при измерениях с классом точности 0,5 или 1,0, например, при использовании ТН для коммер-

ческого учета энергии. В работе рассмотрена возможность применения высокоомных резисторов, включаемых последовательно с высоковольтными обмотками трансформаторов напряжения ЗНОМ-35, используемых только для целей релейной защиты и сигнализации в классе точности 3,0. В сетях 35 кВ такие трансформаторы преобладают и, как показывают расчеты и опыт эксплуатации, достаточно защитить только один комплект трансформаторов напряжения в данной сети, чтобы практически устранить опасность возникновения феррорезонанса.

Также были рассчитаны феррорезонансные области при различных способах защиты, устанавливаемой на трансформаторах напряжения для предотвращения их повреждения. На рис. 7 показано влияние сопротивлений, устанавливаемых как в дополнительные вторичные обмотки трансформаторов напряжения, так и последовательно с первичными обмотками. Как видно из результатов расчётов область становится более узкой, причем сопротивление в обмотке высокого напряжения ТН гасит феррорезонансные явления только при больших значениях ёмкости сети, а во вторичной дополнительной обмотке – при малых емкостях. Таким образом, наиболее эффективной является комплексная защита ТН.

В ходе выполнения данной работы разработана конструкция резистивных защитных устройств, выгодно отличающихся от применявшихся ранее благодаря компактности, малому весу, простоте монтажа и оптимизации параметров.

Приведены данные экспериментальных исследований феррорезонансных перенапряжений в электрических сетях ОАО «Колэнерго» и эффективности предложенных защитных средств, внедряемых в данной энергосистеме при содействии сотрудников ИФТПЭС КНЦ РАН.

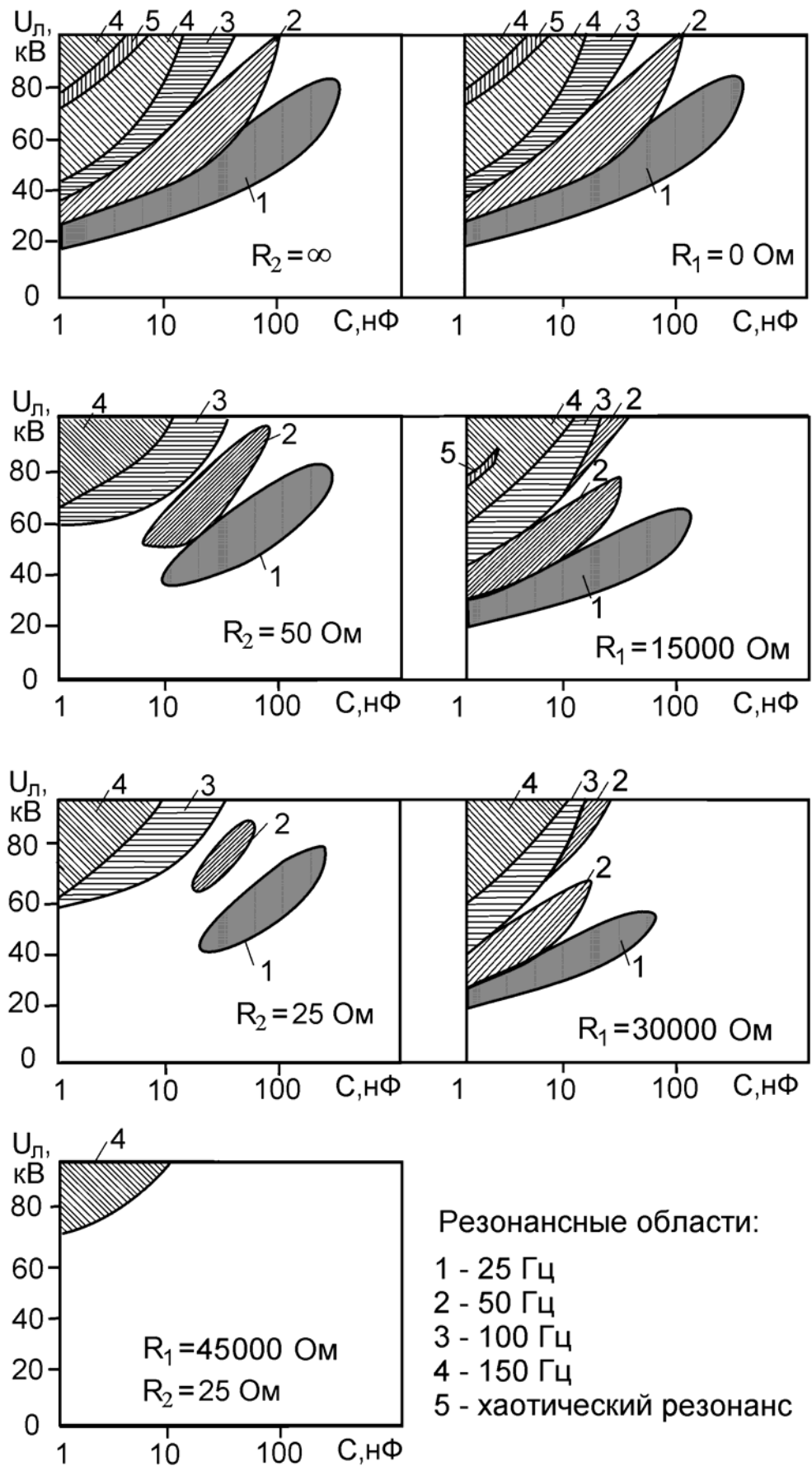


Рис.7. Изменение феррорезонансных областей при установке защитных устройств

В заключении приводятся основные результаты работы.

1. В диссертации выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований феррорезонансных процессов в трехфазных сетях с изолированной нейтралью, охватывающий все многообразие форм и амплитуд колебаний в широком диапазоне изменения параметров и напряжений сети.

2. На основе полученных в работе экспериментальных данных и расчетным путем уточнены формулы, аппроксимирующие кривую намагничивания трансформаторов напряжения (на примере ЗНОМ-35) и обоснована структура его эквивалентной схемы для включения в трехфазную схему замещения сети.

3. Исследованы физические процессы, вызывающие длительные феррорезонансные колебания с преобладающими частотами в спектре от единиц до 150 Гц, показано, что их возникновение обусловлено именно спецификой трехфазных сетей.

4. Путем численного моделирования найдены области существования каждого из видов нелинейных колебаний в координатах независимых переменных: емкость сети – линейное напряжение сети.

5. Разработан метод сравнительного анализа эффективности различных методов защиты электрических сетей от ФРП посредством ортогонализации нелинейных уравнений феррорезонансных колебаний в трехфазной сети путем разложения на α -, β -, 0 -координаты.

6. Показано, что в реальных электрических сетях эффективной является комплексная защита от феррорезонансов, включающая установку резистивных устройств последовательно с первичной обмоткой и в разомкнутый треугольник дополнительных вторичных обмоток. Для большинства сетей без компенсации токов замыкания на землю при величинах этих сопротивлений 30 кОм и 25 Ом соответственно гарантированно устраняется опасность возникновения феррорезонансных явлений.

7. Показано, что защитные резисторы с первичной стороны могут устанавливаться на трансформаторах напряжения, к которым не предъявляются требования высокой точности измерения напряжения. На каждом участке сети, содержа-

щем до семи комплектов ТН, достаточно установить защиту в обмотках высшего напряжения только в одном из них.

8. Выполнены экспериментальные исследования феррорезонансных процессов в действующих сетях. Сопоставление опытных и расчетных данных подтвердили правильность основных положений диссертационной работы. Опытным путем подтверждена эффективность комплексной защиты трансформаторов напряжения от феррорезонансов. Защитные устройства успешно эксплуатируются в течение 7 лет на нескольких подстанциях 35 кВ ОАО «Колэнерго».

9. Разработаны различные варианты исполнения резистивной защиты, в том числе конструкция резистивных защитных устройств подвешенного типа, проверенных в тяжелых климатических условиях Крайнего Севера и внедряемых в настоящее время в высоковольтных сетях.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Защита трансформаторов напряжения от феррорезонансных перенапряжений в разветвленных сетях 35 кВ: Препр.: Апатиты, КНЦ РАН, 1998. - 23 с.

2. Селиванов В.Н. Численное моделирование нелинейных процессов в трехфазных сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения. // Электрофизические проблемы надежности эксплуатации высоковольтных сетей и цепей управления. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999.- С.62-75

3. Селиванов В.Н. Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью с защитой от феррорезонанса // Известия Академии наук. Энергетика, 2001, № 1. – С.93-99

4. Селиванов В.Н. Анализ нелинейных уравнений феррорезонансных колебаний в трехфазной сети путем разложения на α , β , 0-координаты // Труды третьей международной конференции "Дифференциальные уравнения и приложения". Санкт-Петербург, 12-17 июня 2000 г. – С.-Пб.: Изд-во СПбГТУ. - С.132-135

5. Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Аппроксимация кривой намагничивания трансформатора напряжения ЗНОМ-35 // Теоретическая и экспериментальная оценка состояния высоковольтного оборудования энергосистем. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. – С.18-25.