

03.11.84  
E 804  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

УРАЛЬСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М. КИРОВА

На правах рукописи

ЕРШОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ОДНОФАЗНОГО  
ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ  
НАПРЯЖЕНИЕМ 6,10 кВ

Специальность 05.14.02 - "Электрические станции  
(электрическая часть), сети и системы и управление ими"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Свердловск  
1978

СНИИ

Работа выполнена на кафедре "Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
А.А. ПИСТОЛОВ.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент  
О.А. ПЕТРОВ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
В.Е. ПОЛЯКОВ.

кандидат технических наук, доцент  
Р.В. АВРИНСКИЙ

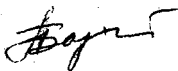
Ведущее предприятие - Ленинградская кабельная сеть  
Ленэнерго.

Защита диссертации состоится "13" ноября 1978 года  
в 14 час. 45 мин. на заседании специализированного Совета  
К 063.14.04 электротехнического факультета УПИ им. С.М.Кирова.  
Главный учебный корпус, ауд. В-503.

Вам отсыл в двух экземплярах, заверенный печатью, просим  
направить по адресу: 620002, г. Свердловск, К-2, УПИ им. С.М.Ки-  
рова, ученому секретарю Совета института, телефон 54-85-74.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского полите-  
хнического института им. С.М.Кирова.

Ученый секретарь  
специализированного Совета  
К 063.14.04

БАРТОЛОМЕЙ П.И.





## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Преобладающая часть электрической энергии, вырабатываемой электростанциями, на своём пути к потребителям проходит через распределительные сети напряжением 6,10 кВ. От показателей работы этих сетей в значительной мере зависят надёжность и экономичность электроснабжения промышленных предприятий и городов.

Основным видом повреждения таких сетей являются однофазные замыкания на землю (ОЗНЗ). Компенсация ёмкостной составляющей тока ОЗНЗ с помощью дугогасящих реакторов, практикуемая в настоящее время для повышения надёжности работы электрических сетей, позволяет уменьшить ток в месте повреждения до уровня активной составляющей и высших гармоник.

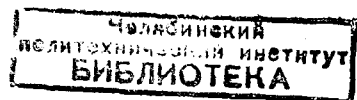
Однако, как показывает опыт эксплуатации, для электрических сетей с током ОЗНЗ 100 А и более, компенсация только одной ёмкостной составляющей не является достаточным условием их надёжной работы. По данным исследований, приводимых в литературе, среднее значение тока ОЗНЗ в электрических сетях напряжением 6,10 кВ составляет 125 А, а в отдельных электрических сетях (около 5% от общего числа сетей) достигает 400-500 А. Следует отметить, что в связи с ускоряющимися темпами промышленного и гражданского строительства интенсивно развиваются и кабельные электрические сети. Это в перспективе ведёт к увеличению среднего значения тока ОЗНЗ. Отсюда следует вывод, что для повышения надёжности работы рассматриваемых электрических сетей необходима также компенсация активной составляющей и высших гармоник остаточного тока ОЗНЗ.

Цель работы. Исследование установившихся и переходных процессов при одновременной компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ, разработка и исследование соответствующих компенсирующих устройств и системы автоматического регулирования их настройки.

Объект исследования. Электрические сети напряжением 6,10 кВ. крупных промышленных предприятий и городов.

Метод исследования. Для решения поставленных задач принят комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение данных научно-технической литературы; математическое описание процессов, протекающих в электрических сетях, с помощью дифференциальных, алгебраических уравнений и их решение с помощью цифровых и аналоговых машин; лабораторные испытания в электрической сети напряжением 6 кВ.

Научная новизна. Получены аналитические соотношения, описывающие установившиеся процессы, и исследованы переходные процессы при одно-



временной компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ. Разработаны и исследованы два устройства компенсации активной составляющей, защищенные двумя авторскими свидетельствами. Определены функции и разработан алгоритм системы автоматического регулирования. Разработаны и исследованы новые способы и устройства автоматической компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ, защищенные четырьмя авторскими свидетельствами. Дана оценка динамических свойств системы автоматического регулирования. Рассмотрены условия горения заземляющей дуги ОЗНЗ и сделан вывод о создании благоприятных условий для гашения заземляющей дуги при введении одновременной компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ.

Практическая ценность. Показано влияние компенсации активной составляющей на работу компенсированной сети и принципиальная возможность одновременной компенсации ёмкостной и активной составляющих. Даны качественные и количественные характеристики различным режимам работы компенсированных электрических сетей. Разработанное устройство компенсации активной составляющей с регулируемым трансформатором и система автоматического регулирования настройки компенсирующих устройств или её отдельные блоки могут быть использованы в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ с целью повышения надёжности их работы.

Реализация результатов работы. Проведено испытание в электрической сети напряжением 6 кВ устройства компенсации активной составляющей. Внедрена в Ленэнерго, Башкирэнерго, Челябинэнерго, Сыктывкарских городских электрических сетях и на Курганском заводе колёсных тягачей стабилизированная тиристорная система управления током подмагничивания дугогасящих реакторов; система мелкосерийно изготавливается предприятием "Энергоналадка" ЦРП Ленэнерго и комплектуется с дугогасящими реакторами с подмагничиванием, которые выпускаются на ТЭЭС ЦРП Ленэнерго. Внедрён в Башкирэнерго и на Курганском заводе колёсных тягачей регулятор для автоматической настройки дугогасящего реактора, действие которого основано на экстремальных характеристиках сети. Внедрён в Челябинэнерго автоматический регулятор, осуществляющий настройку дугогасящего реактора как в нормальном режиме работы электрической сети, так и в режиме однофазного замыкания на землю. Экономический эффект от внедрения автоматической настройки дугогасящих реакторов соответственно составляет 25, 21,3 и 5 тысяч рублей в год. Величина экономического эффекта зависит от разветвленности электрических сетей и количества ОЗНЗ в год в рассматриваемых сетях.

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось и получило одобрение на Республиканском научно-техническом семинаре "Режимы нейтрали электрических систем" (Киев, 1974 г.), межотраслевой научно-технической конференции "Автоматизация технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства" (Сызрань, 1975 г.), двух семинарах Челябинского дома научно-технической пропаганды "Пути улучшения электроснабжения промышленных предприятий" (1975 г.) и "Защита и противоаварийная автоматика в энергосистемах и на промышленных предприятиях" (1976 г.) и конференциях Челябинского политехнического института (1972-1978 гг.).

Публикации. По результатам научных исследований опубликованы 13 печатных работ в научно-технических журналах и сборниках и получено 6 авторских свидетельств.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержание которых изложено на 165 стр. машинописного текста и иллюстрировано 63 рисунками, списка литературы, включающего 156 наименований и 6 приложений.

В первой главе дан обзор современного состояния вопроса и сделан вывод о необходимости компенсации активной составляющей тока ОЗНЗ.

Во второй главе проведён анализ и сравнение способов компенсации активной составляющей, представлены разработки новых компенсирующих устройств.

В третьей главе исследованы процессы в электрической сети при одновременной компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ, условия горения заземляющей дуги. Приведены результаты экспериментального исследования процессов на модели компенсированной сети и результаты испытаний устройства компенсации активной составляющей в электрической сети напряжением 6 кВ ЧЭС Челябинска.

В четвертой главе определены функции и разработан алгоритм работы системы автоматического регулирования настройки компенсирующих устройств, приведен анализ и разработаны способы автоматической настройки, описаны принципиальная и функциональная схемы системы автоматического регулирования и отдельных её блоков.

В пятой главе исследована работоспособность системы автоматического регулирования при различных амплитудных и фазовых характеристиках компенсированной сети, разработана на аналоговой вычислительной машине математическая модель системы автоматического регулирования и проведено исследование её динамических свойств.

В приложениях рассмотрены оценка экономической эффективности

компенсации тока ОЗНЗ и вопросы эксплуатации компенсированных сетей: смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах проводов, синхронизация ОЗНЗ и определение активной проводимости компенсированной сети.

### ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ РАБОТЫ

Активная составляющая тока ОЗНЗ в компенсированной сети обусловлена активными сопротивлениями утечек изоляции фаз сети относительно земли, потерями в меди обмотки компенсации и в стали магнитопровода и стенок х бака дугогасящего реактора, активными сопротивлениями обмоток распределительных трансформаторов, трансформаторов, к нейтрали которых подключаются реакторы, а также кабельных или воздушных линий. Суммарные активные потери элементов компенсированной сети принято характеризовать коэффициентом успокоения

$$d_3 = \frac{1}{R \cdot 3 \omega C}, \quad (I)$$

где  $R$  - эквивалентное активное сопротивление компенсированной сети;  
 $3 \omega C$  - суммарная ёмкость фаз сети относительно земли.

Величина коэффициента  $d_3$  для сетей с нормальной изоляцией может изменяться в пределах 0,05-0,1.

Для компенсации активной составляющей тока ОЗНЗ Петерсеном были предложены два способа - пассивный и активный. Суть этих способов заключается в следующем. При однофазном замыкании на землю к реактивному току, обусловленному наличием дугогасящего реактора, необходимо добавить дополнительный ток, направленный встречно активной составляющей остаточного тока компенсированной сети, путем создания в ней искусственной несимметрии или введения дополнительного напряжения.

Из всего разнообразия компенсирующих устройств, предназначенных для этой цели, в работе рассмотрены следующие статические устройства:

- а) дополнительная ёмкость, подключаемая к отстающей фазе;
- б) дополнительная индуктивность, подключаемая к опережающей фазе;
- в) источник дополнительного напряжения, подключаемый к нейтрали сети через дугогасящий реактор или однофазный трансформатор. Первые два устройства реализуют пассивный способ компенсации, третье устройство - активный.

Достоинством пассивного способа компенсации является то, что его можно сравнительно просто реализовать в электрических сетях напря-

жением до 1000 В. Однако его использование в сетях напряжением 6, 10 кВ связано с рядом трудностей:

- 1) сложность регулирования;
- 2) реакторы с сердечником имеют нелинейную зависимость индуктивности от напряжения. Это может приводить к возникновению феррорезонансных процессов в сети, например, при ОЗНЗ через перемежающуюся дугу;
- 3) устройство компенсации влияет на реактивную составляющую тока ОЗНЗ: расстройка по абсолютной величине может достигать 10-15%. Вследствие этого требуется подстройка дугогасящего реактора;
- 4) подключение дополнительного реактора либо конденсаторной установки непосредственно к фазам сети снижает в целом надежность компенсированной сети.

Активный способ компенсации имеет следующие преимущества:

- 1) устройство, реализующее этот способ, возможно выполнить на напряжение, отличное от напряжения сети, поскольку источник можно подключить к нейтрали сети как через дополнительную обмотку дугогасящего реактора, так и через однофазный трансформатор;
- 2) регулирование величины вводимого напряжения является относительно простой технической задачей.

При введении в сеть дополнительного напряжения  $U_d$  для напряжения смещения нейтрали  $U_0$  и тока в месте повреждения  $I_0$  можно записать следующие соотношения:

$$\frac{U_0}{U_\phi} = \frac{\dot{n}_d + \frac{d_3}{d_d} + j \frac{d_2}{K_d}}{1 + \frac{d_3 + d_2}{K_d} - \frac{1 - K_k}{K_d} + j \left( \frac{d_3 + d_2}{K_d} + \frac{1 - K_k}{d_d} \right)}; \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{U_{оп}}{K_s} \cdot \frac{1 - \dot{n}_d + \frac{d_3}{d_d} - \frac{1 - K_k}{K_d} + j \left( \frac{d_3}{K_d} + \frac{1 - K_k}{d_d} \right)}{1 + \frac{d_3 + d_2}{d_d} - \frac{1 - K_k}{K_d} + j \left( \frac{d_3 + d_2}{K_d} + \frac{1 - K_k}{d_d} \right)} \quad (3)$$

Здесь обозначено:

$d_3 = \frac{1}{R_3 \cdot 3\omega C}$ ,  $d_d = \frac{1}{R_d \cdot 3\omega C}$  - коэффициенты усюноения сети, обусловленные соответственно сопротивлением замыкания  $R_3$  и внутренним сопротивлением  $R_d$  источника напряжения  $U_d$ ;

$K_k = \frac{1}{\omega L_k \cdot 3\omega C}$ ,  $K_d = \frac{1}{\omega L_d \cdot 3\omega C}$  - степени настройки, обусловленные соответственно индуктивностью дугогасящего реактора  $L_k$  и индуктивностью  $L_d$  источника напряжения  $U_d$ ;

$\dot{n}_d = \frac{U_d}{U_\phi}$  - отношение вводимого дополнительного напряжения  $U_d$  к фазному напряжению источника питания.

Если для получения напряжения  $\dot{U}_g$  используется фазное напряжение источника поврежденной фазы  $\dot{U}_{\text{фп}}$ , то из (3) получаются условия настройки компенсации по реактивной и активной составляющим тока ОЗНЗ

$$K_k = 1 + \frac{d_2 \cdot d_g}{K_g}, \quad n_g = 1 + \frac{d_2}{d_g} + \frac{d_2 \cdot d_g}{K_g^2}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что такое введение напряжения  $\dot{U}_g$  оказывает влияние на настройку дугогасящего реактора  $K_k$ , значение которой становится больше 1.

В работе для устранения указанного влияния предложено напряжение  $\dot{U}_g$  вводить с опережением на угол

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_g}{R + R_g}. \quad (5)$$

В этом случае значения настроек будут равны:

$$K_k = 1, \quad n_g = 1 + \frac{d_2}{d_g} + j \frac{d_2}{K_g}, \quad (6)$$

т.е. источник дополнительного напряжения  $\dot{U}_g$  влияния на настройку дугогасящего реактора не оказывает.

В работе сформулированы основные требования к устройствам компенсации активной составляющей. Предложены, разработаны и исследованы устройства с дросселем насыщения и регулируемым трансформатором; устройства защищены двумя авторскими свидетельствами.

Устройство компенсации с дросселем насыщения оказывает минимальное влияние на настройку дугогасящего реактора: при трёхкратном диапазоне изменения параметров сети расстройка не превышает  $\pm 2-3\%$ . Однако из-за нелинейности резонансной характеристики компенсированной сети возможно возникновение автоколебаний напряжения нейтральной сети после отключения ОЗНЗ, что ограничивает его область применения электрическими сетями напряжением до 1000 В, где указанная нелинейность значительно меньше и можно с меньшими затратами достичь увеличения линейной части вольтамперных характеристик дугогасящего реактора.

Второе устройство обеспечивает введение дополнительного напряжения  $\dot{U}_g$  с опережением благодаря трехфазному трансформатору, две вторичные обмотки которого соединены по схеме "зигзаг". Регулирование величины напряжения  $\dot{U}_g$  осуществляется переключением отпаек однофазного трансформатора. Поскольку устройство обеспечивает введение напряжения  $\dot{U}_g$  с фиксированным углом опережения, то при трёхкратном диапазоне изменения параметров сети расстройка реактора изменяется в пределах  $\pm 5-7\%$ , при двухкратном - в пределах  $\pm 3-5\%$ .



Испытания устройства, проведенные в электрической сети напряжением 6 кВ ЧЭС Челябинэнерго, дали положительные результаты.

Важным этапом изучения вопросов компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ является теоретическое исследование переходных процессов компенсированной сети, проведенное в работе двумя путями:

а) составление системы уравнений, решение её относительно напряжения нейтрали  $\dot{U}_0$  и вычисление различных характеристик с помощью цифровой вычислительной машины;

б) разработка математической модели на аналоговой вычислительной машине и исследование различных режимов работы сети.

Проведенные теоретические исследования дали следующие результаты:

1. Параметры источника дополнительного напряжения  $\dot{U}_g$  оказывают существенное влияние на переходные процессы.

1.1. Индуктивность  $L_g$ , уменьшая общую индуктивность контура нулевой последовательности, приводит к увеличению частоты свободных колебаний напряжения нейтрали  $\dot{U}_0$  после отключения ОЗНЗ в 1,4-1,7 раза.

1.2. Активное сопротивление  $R_g$  усиливает демпфирование компенсированной сети, обуславливая практическое затухание переходных процессов после отключения ОЗНЗ за 1-2 периода промышленной частоты.

2. Восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе после отключения ОЗНЗ не превышает  $1,0-1,1 U_{\phi}$  при настройках дугогасящего реактора, изменяющихся в пределах 0,5-2, и величинах вводимого напряжения  $\dot{U}_g$  от 0,4 до  $1,2 U_{\phi}$ .

3. Напряжения смещения нейтрали и поврежденной фазы строго определяются величиной вводимого для компенсации активной составляющей дополнительного напряжения как при замыкании на землю, так и после его отключения.

4. При плавном введении и выведении напряжения  $\dot{U}_g$  за промежуток времени, больший 3-5 периодов промышленной частоты, протекающие в сети переходные процессы можно рассматривать как квазистационарные. Указанное протекание процесса можно использовать для восстановления нормального режима работы компенсированной сети после самоликвидации ОЗНЗ. Время уменьшения напряжения  $\dot{U}_g$  следует выбирать из условия восстановления электрической прочности поврежденного промежутка.

5. При точной настройке компенсации реактивной и активной составляющих напряжение на поврежденной фазе относительно земли и остаточный ток в месте повреждения содержат только высшие гармоники. На основании анализа имеющихся в литературе экспериментальных ис-

следований условия горения дуги и уровней напряжений высших гармоник на поврежденном промежутке можно сделать вывод, что при полной компенсации тока ОЗНЗ промышленной частоты в электрических сетях напряжением 6,10 кВ создаются благоприятные условия для гашения заземляющей дуги высших гармоник.

Экспериментальные исследования, проведенные на трёхфазной модели компенсированной сети и в реальной электрической сети напряжением 6 кВ ЧЭС Челябинска, подтвердили правильность полученных результатов теоретических исследований установившихся и переходных процессов, протекающих при одновременной компенсации ёмкостной и активной составляющих тока ОЗНЗ.

Результатами теоретических и экспериментальных исследований не подтверждается положение, высказываемое некоторыми авторами об отрицательных факторах компенсации активной составляющей тока ОЗНЗ. В частности, что "... при перекомпенсации активной составляющей будет иметь место отрицательное демпфирование, которое приведет к увеличению смещения нейтрали". Как показали наши исследования, перекомпенсация активной составляющей ведёт не к отрицательному демпфированию, а к изменению направления активной составляющей тока ОЗНЗ. При этом напряжение нейтрали  $U_0$  действительно может превысить фазное значение. Однако величина напряжения  $U_0$  строго определяется параметрами электрической сети и компенсирующих устройств как в режиме ОЗНЗ, так и после его отключения.

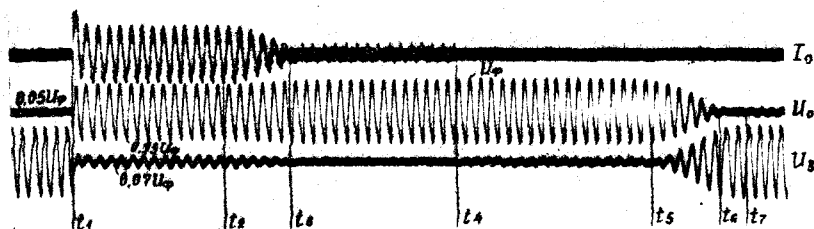


Рис. 1.

На рис. 1 представлена осциллограмма, снятая на модели компенсированной сети и иллюстрирующая работу системы компенсации ёмкостной и активной составляющих при ОЗНЗ. В нормальном режиме работы сети (до момента времени  $t_1$ ) устройство компенсации активной составляющей отключено, а дугогасящий реактор настроен в резонанс с сетью: напряжение смещения нейтрали  $U_0$  равно примерно  $0,05 U_\phi$ . В момент времени  $t_1$  возникает ОЗНЗ. Напряжение нейтрали  $U_0$  возрастает до

$0,93U_{\phi}$ , напряжение на поврежденной фазе  $U_3$  снижается до  $0,07U_{\phi}$ . Остаточный ток замыкания  $I_0$  содержит активную составляющую, равную примерно 10% полного тока ОЗНЗ, и высшие гармоники. В момент времени  $t_2$  включается устройство компенсации активной составляющей и плавно увеличивается вводимое для компенсации активной составляющей напряжение  $U_2$ . С момента времени  $t_3$  напряжение  $U_0$  становится равным фазному - обеспечивается точная компенсация основной гармоники тока ОЗНЗ. Остаточный ток  $I_0$ , как и напряжение поврежденной фазы  $U_3$ , содержит только высшие гармонические составляющие. В момент времени  $t_4$  отключается ОЗНЗ. Основная гармоника в напряжениях  $U_0$  и  $U_3$  при этом не изменяется, увеличивается только уровень высших гармоник в напряжении поврежденной фазы  $U_3$ . В период времени  $t_5$  по  $t_6$  осуществляется процесс восстановления нормального режима работы компенсированной сети. Напряжение  $U_2$  плавно уменьшается, обуславливая увеличение напряжения  $U_3$  с нуля до фазного значения. В момент времени  $t_7$  устройство компенсации активной составляющей отключается и электрическая сеть переходит в нормальный режим работы.

Рассмотренная осциллограмма показывает многообразие операций, которые должна выполнять система автоматического регулирования настройки компенсации тока ОЗНЗ. С этой целью в работе определены функции и разработан алгоритм системы, которая обеспечивает:

1) в нормальном режиме работы сети регулирование резонансной или заданной настройки дугогасящего реактора, поддержание в отключенном состоянии устройства компенсации активной составляющей и сохранение в "памяти" этого устройства информации о настройке при предыдущем ОЗНЗ;

2) при возникновении ОЗНЗ сохранение или корректирование настройки дугогасящего реактора, включение устройства компенсации активной составляющей, выбор необходимой фазы вводимого напряжения  $U_2$  и восстановление настройки, которая была при предыдущем ОЗНЗ;

3) в режиме ОЗНЗ регулирование настроек дугогасящего реактора и устройства компенсации активной составляющей в соответствии с изменениями параметров сети;

4) при ликвидации ОЗНЗ определение момента отключения ОЗНЗ и сохранение настроек компенсации в течение некоторого заданного времени (для восстановления электрической прочности поврежденного промежутка или на случай возникновения повторного пробоя);

5) при восстановлении нормального режима работы сети блокирование канала настройки дугогасящего реактора, "запоминание" значения настройки компенсации по активной составляющей, выведение напряже-

ния  $U_0$  до минимального уровня, последующее отключение устройства компенсации активной составляющей и снятие блокировки канала настройки дугогасящего реактора. Далее электрическая сеть переходит в нормальный режим работы.

Эффективность компенсации тока ОЗНЗ существенно зависит от точности настройки компенсирующих устройств, которая определяется работой системы автоматического регулирования. Компенсацию активной составляющей целесообразно рассматривать только при наличии точной компенсации ёмкостной составляющей, так как при расстройках дугогасящего реактора, равных  $\pm 5-10\%$ , реактивная составляющая становится соизмеримой с активной и компенсация последней может потерять смысл. В связи с этим система автоматического регулирования должна обеспечивать настройку компенсирующих устройств как в нормальном режиме работы электрической сети, так и при ОЗНЗ.

Из всего разнообразия способов настройки дугогасящего реактора в нормальном режиме работы сети наиболее предпочтительными являются способы настройки по экстремальным характеристикам и ёмкостной проводимости компенсированной сети. Достоинством первого способа является простота реализации; к его недостаткам следует отнести необходимость введения коррекции настройки дугогасящего реактора с целью учёта нелинейности его вольтамперных характеристик и зависимость напряжения смещения нейтрали от степени несимметрии сети. Достоинством второго способа является учёт нелинейности характеристик дугогасящего реактора, недостатками - некоторая сложность реализации (требуется специальный генератор колебаний); система компенсации, реализующая способ, получается измерительной и разомкнутой.

В режиме ОЗНЗ настройку дугогасящего реактора можно проводить, используя только амплитудные и фазовые характеристики напряжений нейтрали  $U_0$  и поврежденной фазы  $U_2$ , например, по реактивной составляющей напряжения поврежденной фазы  $U_2$  - проекции вектора  $U_2$  на направление, перпендикулярное вектору фазного напряжения источника поврежденной фазы  $U_{\phi}$ . Использование способа настройки дугогасящего реактора по частоте свободных колебаний напряжения нейтрали  $U_0$  при введении компенсации активной составляющей неприемлемо, так как на эту частоту оказывает влияние источник вводимого напряжения  $U_0$ .

По данным литературного и экспертного анализа способов автоматического регулирования настройки устройства компенсации активной составляющей не было обнаружено.

Особенностью системы компенсации активной составляющей является

то, что в нормальном режиме работы сети соответствующее компенсирующее устройство отключено. Поэтому применение замкнутых систем автоматического регулирования в этом режиме невозможно. Следовательно, требуемую настройку можно определить только с помощью измерений активной проводимости сети, либо хранить информацию о настройке при преддущем ОЗНЗ.

В работе предложен способ автоматической настройки компенсации, защищенный авторским свидетельством. Он основан на замере активной составляющей напряжения поврежденной фазы  $\dot{U}_z$  - проекции вектора  $\dot{U}_z$  на направление вектора напряжения  $\dot{U}_{\text{фн}}$ .

На основании проведенного анализа способов автоматической настройки компенсации разработан автоматический регулятор, осуществляющий:

а) настройку дугогасящего реактора в нормальном режиме работы по экстремальным характеристикам компенсированной сети с введением коррекции настройки с учётом нелинейности вольтамперных характеристик реактора; в режиме ОЗНЗ по реактивной составляющей напряжения поврежденной фазы  $\dot{U}_z$ ;

б) настройку устройства компенсации активной составляющей по активной составляющей напряжения  $\dot{U}_z$ .

Одной из важных составных частей системы автоматического регулирования является тиристорная система управления током подмагничивания дугогасящего реактора, обеспечивающая большое быстроедействие, стабилизацию тока подмагничивания при колебаниях напряжения питающей сети и изменении температуры окружающей среды и самих обмоток подмагничивания реактора.

С целью изучения работоспособности системы автоматического регулирования проведено исследование амплитудных и фазовых характеристик напряжений нейтрали  $\dot{U}_0$  и поврежденной фазы  $\dot{U}_z$ . Показано, что при некоторых параметрах сети и компенсирующих устройств система автоматического регулирования может получать ложную информацию о настройках компенсации по реактивной и активной составляющим тока ОЗНЗ. Анализ характерных режимов показал, что ложная информация может возникать только по одной из составляющих. Благодаря этому система каждый раз должна обеспечивать точную компенсацию тока ОЗНЗ.

Для исследования динамических свойств системы автоматического регулирования компенсирующих устройств, а также тиристорной системы управления током подмагничивания дугогасящего реактора разработана математическая модель на аналоговой вычислительной машине. Исследование подтвердило работоспособность системы автоматического регули-

рования и позволило определить оптимальные значения некоторых параметров и использовать их при разработке схемы автоматического регулятора.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Проведено исследование способов компенсации активной составляющей тока ОЗНЗ. Показано, что для электрических сетей напряжением 6,10 кВ перспективным является способ компенсации, при котором в сеть вводится регулируемое напряжение.

2. Предложено, разработано и исследовано устройство компенсации активной составляющей с регулируемым трансформатором, которое обеспечивает необходимые регулировочные характеристики и может быть использовано в электрических сетях напряжением 6,10 кВ для компенсации активной составляющей тока ОЗНЗ.

3. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование установившихся и переходных процессов компенсированной сети. Показано, что при введении компенсации активной составляющей имеет место устойчивый режим нейтрали, причём напряжение смещения нейтрали строго определяется параметрами сети и компенсирующих устройств. Проведенные испытания в электрической сети напряжением 6 кВ ЧЭС Челябинско-энерго подтвердили правильность основных теоретических выводов, полученных в работе.

4. Показано теоретически, что при полной компенсации тока ОЗНЗ промышленной частоты напряжение высших гармоник на поврежденном промежутке оказывается недостаточным для поддержания устойчивого горения заземляющей электрической дуги, т.е. создаются благоприятные условия для самоликвидации ОЗНЗ.

5. Применение компенсации активной составляющей создаёт возможность регулирования процесса восстановления нормального режима электрической сети после гашения заземляющей дуги.

6. Разработан алгоритм работы системы автоматического регулирования настройки компенсации тока ОЗНЗ. Проведен анализ известных и предлагаемых способов автоматической настройки компенсирующих устройств; разработан автоматический регулятор, осуществляющий настройку компенсирующих устройств как в нормальном режиме работы сети, так и при ОЗНЗ.

7. Исследованы амплитудные и фазовые характеристики компенсированной сети. Показано, что при реальных параметрах компенсирующих

устройств и электрической сети и различных видах ОЗНЗ система должна принципиально обеспечивать точную настройку компенсации. Проведено исследование на аналоговых вычислительных машинах тиристорной системы управления током подмагничивания дугогасящего реактора, а также всей системы автоматической настройки компенсации. Это позволило определить оптимальные параметры и использовать их при разработке автоматического регулятора.

Задачами дальнейшего исследования являются:

- а) исследование вопросов эксплуатации электрической сети при полной компенсации тока ОЗНЗ промышленной частоты;
- б) исследование установившихся и переходных процессов при компенсации тока ОЗНЗ с учётом нелинейности характеристик электрической сети и компенсирующих устройств;
- в) разработка более совершенных устройств компенсации тока ОЗНЗ;
- г) анализ статистических данных работы компенсированных сетей.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Петров О.А., Ершов А.М. Тиристорные системы управления дугогасящими катушками с подмагничиванием. "Промышленная энергетика", 1973, № 10, с.28-31.
2. Петров О.А., Ершов А.М. Компенсация активной составляющей тока однофазного замыкания на землю. В кн. "Режимы нейтрали в электрических системах", Киев, "Наукова думка", 1974, с.120-125.
3. Ершов А.М., Петров О.А. О величинах перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью при металлическом замыкании на землю. Труды ЧПИ "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", вып.141, Челябинск, 1974, с.25-29.
4. Петров О.А., Ершов А.М., Кунгуров С.Л. Интегрирование и запоминание в экстремальных системах с независимым поиском. "Известия вузов. Электромеханика", 1975, № 1, с.16-19.
5. Петров О.А., Ершов А.М. О способах компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях. Тезисы докладов конференции "Автоматизация технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства", Куйбышев, 1975, с.236-237.
6. Петров О.А., Ершов А.М. Устройство для автоматической компенсации ёмкостного тока замыкания на землю. Авторское свидетельство № 549825, Бюллетень изобретений, 1975, № 5.

0196211

7. Петров О.А., Ершов А.М. Компенсация активной составляющей тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях. "Известия вузов. Энергетика", № 10, с.10-15.

8. Петров О.А., Ершов А.М., Гиля В.И. Способ автоматической настройки катушки индуктивности с подмагничиванием в резонанс с ёмкостью. Авторское свидетельство № 491179, Бюллетень изобретений, 1975, № 41.

9. Петров О.А., Ершов А.М., Гиля В.И. Устройство для автоматической настройки и индуктивности с подмагничиванием в резонанс с ёмкостью. Авторское свидетельство № 491180, Бюллетень изобретений, 1975, № 41.

10. Петров О.А., Ершов А.М. Устройство для компенсации активной составляющей тока замыкания на землю. Авторское свидетельство № 494817, Бюллетень изобретений, 1975, № 45.

11. Петров О.А., Ершов А.М. Запоминание информации в системах автоматической компенсации ёмкостных токов. Труды ЧПИ "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", вып.160, Челябинск, 1975, с.21-24.

12. Петров О.А., Ершов А.М., Гиля В.И. Стабилизированные системы управления током подмагничивания дугогасящих реакторов. "Промышленная энергетика", 1977, № 1, с.16-18.

13. Ершов А.М., Петров О.А. Способы компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю. "Известия вузов. Энергетика", 1977, № 3, с.37-42.

14. Петров О.А., Ершов А.М. Устройство для компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю. Авторское свидетельство № 559325, Бюллетень изобретений, 1977, № 19.

15. Петров О.А., Ершов А.М. Способ автоматической компенсации активной составляющей тока замыкания на землю. Авторское свидетельство № 565346, Бюллетень изобретений, 1977, № 26.

16. Ершов А.М., Петров О.А. Исследование на АВМ процессов в электрических сетях с компенсацией тока однофазного замыкания на землю. "Известия вузов. Энергетика", 1977, № 6, с.29-34.

17. Ершов А.М. Об условиях горения заземляющей дуги при полной компенсации тока однофазного замыкания на землю промышленной частоты. Труды ЧПИ "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", вып.191, 1977, с.15-20.

18. Ершов А.М., Петров О.А. Исследование на физической модели компенсированной сети процессов при полной компенсации тока одно-



фазного замыкания на землю. Труды ЧПИ "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", вып.191, Челябинск, 1977, с.12-15.

19. Петров О.А., Ершов А.М., Гыря В.И. Система настройки дугогасящих реакторов по максимуму напряжения смещения нейтрали. "Электрические станции", 1978, № 2, с.83-85. .