


На правах рукописи



ВАЙНШТЕЙН РОБЕРТ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ГЕНЕРАТОРОВ И СЕТЕЙ  
СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
НИЗКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ НУЛЕВОЙ  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре «Электроэнергетические системы и сети»

Официальные оппоненты:

**Шуин Владимир Александрович,**  
доктор технических наук, профессор

**Манусов Вадим Зиновьевич**  
доктор технических наук, профессор

**Горелов Валерий Павлович**  
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск**

Защита состоится «14» декабря 2011 г. в 10-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.10 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Национального исследовательского Томского политехнического университета».

Автореферат разослан «08» ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских  
и кандидатских диссертаций  
Д212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов и в электрических сетях  $6 \div 35$  кВ является одним из важнейших видов релейной защиты. Несмотря на большое количество работ, посвященных разработке защиты от замыканий на землю, задача ее дальнейшего усовершенствования остается актуальной. Это объясняется с одной стороны большим многообразием схем и параметров электроустановок, а с другой стороны сложностью и многообразием электрических процессов при замыкании на землю даже в одной электроустановке.

Проблемы выполнения защиты от замыканий на землю проявляются в разной степени в зависимости от режима заземления нейтрали. Наиболее сложной, как известно, является задача выполнения защиты в электроустановках с компенсацией емкостного тока. Определенные принципиальные и технические трудности имеют место также при выполнении защиты от замыканий на землю в электрических сетях с малыми емкостными токами замыкания на землю при изолированной нейтрали. В настоящее время в отечественной практике имеет место переход в таких сетях к резистивному заземлению нейтрали, что в некоторой степени улучшает условия выполнения защиты.

Многолетний опыт эксплуатации защит от замыканий на землю разного исполнения показал, что при их разработке обязательно должно учитываться условие совместимости функционирования как при устойчивых, так и при дуговых перемежающихся замыканиях. Неудачи многих известных попыток создания защиты на том или ином принципе чаще всего объясняются недостаточным учетом процессов при перемежающихся замыканиях.

В настоящее время часто предлагается заземлять нейтраль через резистор, который создаёт такой достаточно большой ток в месте замыкания, что дуга становится устойчивой. Выполнение защиты при этом упрощается, но она должна во всех случаях действовать на отключение, в том числе и потому, что заземляющий резистор по техническим и экономическим причинам может быть рассчитан только на кратковременную работу. При отказе защиты или выключателя поврежденного элемента резистор должен отключаться, что переводит сеть в режим изолированной нейтрали, при котором возможны перенапряжения и возникновение многоместных замыканий. Кроме этого одним из препятствий для решения задачи таким путем может являться неготовность потребителей к немедленному отключению при замыкании на землю.

Наличие селективной защиты при сохранении режимов заземления нейтрали, допускающих работу при замыкании в течение некоторого времени, позволит устанавливать действие защиты либо на сигнал, либо на отключение в зависимости от конкретных условий.

При выполнении защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих в составе электрической сети или в блоке с трансформатором, обязательным является требование отсутствия зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали. Это требование не может быть выполнено с использованием естественных электрических величин промышленной частоты.

Возможный способ выполнения защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов зависит от схемы подключения генераторов. В этом отношении можно выделить схемы блоков генератор-трансформатор, в которых генераторы не имеют гальванической связи с распределительной сетью или с другими генераторами, и схемы в которых такая гальваническая связь имеется. В последнем случае требуется дополнительно обеспечить селективность защиты. Решение этой задачи для генераторов по сравнению, например, с кабельными линиями усложняется еще и тем, что практически для выделения тока нулевой последовательности можно использовать только фильтры, выполняемые на фазных трансформаторах тока, которые имеют большой ток небаланса промышленной частоты.

Известные способы преодоления названных проблем при выполнении защиты от замыканий на землю в общем сводятся к использованию либо естественных, либо искусственно создаваемых электрических величин, с частотой, отличающейся от промышленной. В качестве естественных электрических величин используются составляющие переходного процесса, возникающие при пробое изоляции фазы на землю, и высшие гармоники.

Известен ряд предложений по выполнению защиты с наложением вспомогательного контрольного тока для решения задачи устранения зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали для случаев, когда генератор не имеет гальванической связи с другими элементами. В этом случае накладываемый контрольный ток может быть весьма малым, так как нет необходимости измерять его в ветвях первичной схемы.

При выполнении защиты элементов разветвленных электрических сетей и защиты обмотки статора генераторов, имеющих гальваническую связь с другими генераторами или с внешней сетью, контрольный ток должен быть таким, чтобы его можно было надежно измерить с помощью фильтров тока нулевой последовательности.

Несмотря на то, что принципиальная возможность выполнения защиты с наложением контрольного тока для таких объектов достаточно очевидна, законченные и проверенные в эксплуатации технические решения, насколько нам известно, отсутствуют. Это, по-нашему мнению, объясняется рядом причин. Во-первых, не была решена задача создания источника контрольного тока, удовлетворяющего ряду принципиально необходимых требований, а также требованию технической надежности и простоты эксплуатации. Во-вторых, параметры источника контрольного тока, в частности частота контрольного тока, должны быть такими, чтобы обеспечивалось упомянутое выше требование о совместимости функционирования защиты при устойчивых и дуговых перемежающихся замыканиях.

В данной работе приведены результаты исследований, выполненных автором и под его руководством, целью которых было решение изложенных выше актуальных задач.

При выборе к представлению на суд специалистов результатов работы автор руководствовался тем, что эти результаты, во-первых, объединены идеей использования низкочастотных гармоник тока нулевой последовательности и,

во-вторых, устройства, выполненные на основе этих результатов, достаточно широко используются на электростанциях и в электрических сетях.

**Целью исследования** является разработка методов выполнения защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов и в электрических сетях 6÷35 кВ, при которых обеспечивается совместимость функционирования защиты при устойчивых и дуговых перемежающихся замыканиях, и разработка специальных технических средств для выполнения защиты.

Для достижения указанной цели **поставлены и решены следующие задачи.**

1. Создание источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю элементов (линий, генераторов) в электроустановках с компенсацией емкостного тока.

1.1. Исследования электромагнитного параметрического делителя частоты на два, на базе которого создан источник контрольного тока, позволившие получить для сложной нелинейной системы соотношения для последующего расчета и проектирования источника контрольного тока.

1.2. Исследование работы электромагнитного параметрического делителя частоты в условиях его включения в цепь дугогасящих реакторов и разработка технических мероприятий, обеспечивающих выполнение всех требований, предъявляемых к источнику контрольного тока.

1.3. Разработка методики расчета и конструирования источника контрольного тока.

2. Исследование электрических процессов при дуговых перемежающихся замыканиях с целью разработки алгоритмов обработки токов нулевой последовательности, при которых обеспечивается совместимость функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся замыканиях.

3. Разработка основ технической реализации защиты от замыканий на землю для ряда конкретных объектов.

3.1. Электрические сети с компенсацией емкостного тока, сети с высокоомным резистивным заземлением нейтрали и с изолированной нейтралью.

3.2. Генераторы, работающие на сборные шины генераторного напряжения в сети с компенсацией емкостного тока.

3.3. Гидрогенераторы, работающие в укрупненном блоке параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора.

3.4. Гидрогенераторы, работающие в блоке с трансформатором и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор.

4. Исследование и разработка устройства для непрерывного контроля степени расстройки компенсации емкостного тока замыкания и коэффициента демпфирования в электрических сетях с заземлением нейтрали через дугогасящие реакторы на основе использования электрических величин с частотой контрольного тока в нормальном режиме работы сети.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использованы методы теории нелинейных цепей с периодически изменяющимися параметрами, методы спектрального анализа, методы статистических испытаний, компьютерное моделирование и физический эксперимент.

Достоверность научных положений и результатов, изложенных в диссертации, определяется совпадением результатов аналитических исследований с данными физического эксперимента и компьютерного моделирования, а также положительным опытом эксплуатации устройств защиты от замыканий на землю, в том числе в составе комплексной защиты генераторов, выпускаемой НПП «ЭКРА».

**Научная новизна.** По результатам исследования процессов при дуговых перемежающихся замыканиях:

1. Выявлена существенная для выполнения защиты особенность процесса при дуговых перемежающихся замыканиях, заключающаяся в том, что при наличии в сети общей для всех элементов цепи для стекания избыточных зарядов после погасания дуги, интеграл тока за время между двумя соседними пробоями изоляции на поврежденном элементе пропорционален суммарному изменению зарядов емкостей фаз сети, а на неповрежденных элементах – близок к нулю;

2. Показано, что свойства интеграла токов нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях с достаточной точностью отображаются в соотношении амплитуд гармонических составляющих тока нулевой последовательности в определенной области частот, зависящей от режима заземления нейтрали. В электроустановках с компенсацией емкостного тока эта область низких частот до  $30 \div 35$  Гц, а в электроустановках с высокоомным резистивным заземлением или с изолированной нейтралью – до  $70 \div 80$  Гц;

3. Установлено, что при выполнении защиты на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности значительно ослабляется влияние на работу защиты ряда случайных параметров электроустановки, таких как собственные частоты, коэффициенты затухания контуров на пути переходных емкостных токов и распределение емкости фаз сети между ее отдельными элементами;

4. Показано, что наличие в электрической сети с компенсацией емкостного тока постоянно работающего источника контрольного тока с частотой ниже промышленной дает возможность получить информацию непосредственно об относительных параметрах контура нулевой последовательности – расстройки компенсации и коэффициенте демпфирования по измерению одной величины – напряжения на дугогасящем реакторе.

По результатам исследования электромагнитного параметрического делителя частоты:

5. Показано, что при высокой степени нелинейности ферромагнитных сердечников, на которых выполнен делитель частоты, условия возбуждения колебаний половинной частоты с достаточной точностью могут быть получены на основе использования первого или нулевого приближения границы устойчивости решения дифференциального уравнения с периодически изменяющимся коэффициентом;

6. Показано, что в стационарном режиме деления частоты в условиях, когда амплитуда колебаний половинной частоты имеет значение, близкое к максимальному, электромагнитный режим делителя частоты определяется в

основном составляющей половинной частоты, а составляющие с частотой источника питания и постоянная составляющая в расчётных соотношениях могут не учитываться;

7. Выявлен механизм влияния на режим работы электромагнитного параметрического делителя частоты факторов, имеющих место при его включении в цепь дугогасящих реакторов, и обоснованы мероприятия снижения этого влияния, при которых одновременно исключается влияние источника на режим нейтрали.

### **Практическая значимость и реализация результатов**

1. Впервые принцип выполнения защиты от замыканий на землю на основе наложения вспомогательного (контрольного) тока с частотой, отличающейся от промышленной, реализован таким образом, что обеспечивается возможность измерения контрольного тока в первичных цепях, что в свою очередь позволяет выполнить селективную защиту гальванически связанных элементов электроустановки.

2. Разработан и достаточно широко внедрен в практику релейной защиты новый технический элемент – источник контрольного тока с частотой 25 Гц, удовлетворяющий комплексу предъявляемых к нему требований.

3. Разработаны и апробированы длительной эксплуатацией защиты от замыканий на землю в следующих видах электроустановок:

3.1. Электрические кабельные сети с компенсацией емкостного тока;

3.2. Защиты без зоны нечувствительности от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, включенных на сборные шины генераторного напряжения, с использованием фильтра токов нулевой последовательности на типовых фазных трансформаторах тока;

3.3. Избирательная защита без зоны нечувствительности от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов, работающих в укрупненном блоке параллельно на одну обмотку низкого напряжения повысительного трансформатора;

3.4. Защита от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор;

3.5. Защита от замыканий на землю в электрических сетях с резистивным заземлением или с изолированной нейтралью;

3.6. Устройство для непрерывного контроля и автоматической настройки дугогасящих реакторов в электрических сетях с компенсацией емкостного тока.

Устройства защиты от замыканий на землю по п.п. 3.2; 3.3; 3.4; применяются в составе комплексной цифровой защиты генераторов, выпускаемых ООО НПП «ЭКРА». Перечисленные выше устройства эксплуатируются на следующих энергетических объектах: Ново-Кемеровская ТЭЦ, Кемеровская ГРЭС, Кемеровская ТЭЦ, Западно-Сибирская ТЭЦ, Беловская ГРЭС, Красноярская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС, Нижне-Камская ГЭС и других.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. При наличии в электрической сети общей для всех элементов цепи для стекания избыточных зарядов с емкостей фаз, накопившихся при горении дуги, совместимость функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся

замыканиях обеспечивается при использовании составляющих токов нулевой последовательности в области низких частот, которая определяется режимом заземления нейтрали.

2. Значения амплитуд низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности инвариантны к многообразию электрических процессов при горении дуги и многообразию параметров защищаемого объекта.

3. Основные расчетные соотношения, необходимые для выбора конструктивных параметров источника контрольного тока с частотой 25 Гц, выполненного на базе электромагнитного параметрического делителя частоты, могут быть получены при использовании первого или нулевого приближения границы устойчивости решения уравнения с периодически изменяющимся коэффициентом.

4. Видоизменённая схема электромагнитного параметрического делителя частоты, благодаря которой обеспечивается достаточно полное выполнение всех требований, предъявляемых к источнику контрольного тока.

5. Включение источника контрольного тока в цепь дугогасящих реакторов обеспечивает комплексное решение вопросов эксплуатации электрической сети, а именно, селективную защиту линий, генераторов, включенных на сборные шины, непрерывный контроль и автоматическую настройку дугогасящих реакторов.

6. Селективность защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов укрупненного блока обеспечивается как при устойчивых, так и при перемежающихся замыканиях за счет сравнения низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности на выводах и в нейтрали генераторов.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения, на которых базируется данная работа, предложены автором. Научные исследования проводились группой сотрудников и аспирантов ТПУ под руководством автора.

Все опубликованные работы основаны на предложениях автора и написаны либо им лично, либо под его непосредственным руководством.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках следующих мероприятий: Международная конференция «Релейная защита и автоматика современных энергосистем сверхвысокого напряжения», Чебоксары, 2007 г.; Всероссийская конференция «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6÷35 кВ», Новосибирск, 2004, 2006, 2008 гг.; Симпозиум KORUS, Томск, 1998 г.; Всероссийская конференция «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность», Томск, 1997-2003 гг.; Пятая Всесоюзная конференция, Ташкент, 1975 г.; Третья Всесоюзная Межвузовская конференция по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, 1967 г.

**Публикации.** По направлению диссертационной работы автором опубликовано 70 работ, в т.ч. 24 в изданиях, рекомендованных ВАК, 26 патентов и авторских свидетельств и др. В библиографическом списке автореферата указано 46 основных работ.



## Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 119 наименований и шести приложений. Основное содержание диссертации изложено на 283 страницах, содержит 127 рисунков и 6 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов, обозначен круг задач, решаемых в диссертации.

Краткое обсуждение известных работ в области защиты от замыканий на землю и режимов заземления нейтрали приводятся в соответствующих разделах работы. Значительный вклад в эти области техники внесли И.М. Сирота, В.М. Кискачи, В.А. Шуин, А.И. Шалин, Ю.В. Целебровский, А.И. Левиуш, В.Г. Алексеев, К.П. Кадомская, Г.А. Евдокунин, М.И. Петров, Л.И. Сарин, В.К. Обабков, М.И. Гумин, А.Г. Долгополов, А.А. Челаэнов.

**Глава 1** посвящена анализу электромагнитного параметрического делителя частоты и разработке источника контрольного тока с частотой 25 Гц.

Источник контрольного тока (ИКТ) для электрической сети с компенсацией емкостного тока должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Включение ИКТ не должно влиять на процессы при устойчивых и дуговых перемежающихся замыканиях на землю, то есть не должно влиять на режим рабочего заземления сети;
2. Контрольный ток должен вырабатываться как при замыканиях в точках сети, имеющих некоторый потенциал относительно земли, так и при замыканиях в нейтральных точках генераторов и двигателей;
3. Источник контрольного тока должен обладать высокой надежностью и не требовать постоянного обслуживания.

Источник контрольного тока включается в объединенную цепь заземления дугогасящих реакторов (ДГР) (рис. 1).

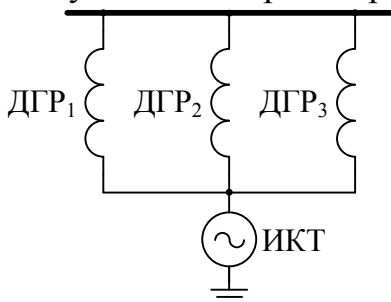


Рис. 1. Схема включения ИКТ в цепь дугогасящих реакторов

Основной задачей, которая ставилась при анализе делителя частоты, является получение соотношений для поиска схемотехнических решений, при которых удовлетворяются требования, предъявляемые к ИКТ, а также необходимых для выбора основных конструктивных параметров для проектирования и изготовления ИКТ.

Электромагнитный параметрический делитель частоты является известным устройством. Впервые параметрические колебания в электрических системах были реализованы Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси. Ими также впервые предложено использовать для реализации параметрических колебаний в электрических цепях управляемую индуктивность с ферромагнитным сердечником.

Вклад в разработку теории и практического применения параметрических систем на основе нелинейной индуктивности внесли ученые: А.М. Бамдас, С.В. Шапиро, А.Н. Давыдова, Л.А. Сеницкий, Ю.М. Шумков, Л.А. Бессонов и другие.

Особые условия применения электромагнитного параметрического делителя частоты в данном случае не позволяют непосредственно использовать результаты этих работ.

Для создания ИКТ использован делитель частоты с вентилем в цепи питания (рис. 2). Обмотки  $w_1$  образуют цепь, называемую в дальнейшем цепью возбуждения, которая подключается к источнику с частотой  $2\omega$ . Обмотки  $w_2$  образуют вместе с конденсатором  $C_K$  параметрически возбуждаемый колебательный контур.

При анализе действительная петлевая зависимость между индукцией и напряженностью поля в сердечниках делителя частоты заменяется средней кривой намагничивания, полученной по предельному циклу намагничивания, которая аппроксимируется выражением  $h = \alpha \cdot \text{sh}\beta b$ , где  $h$  и  $b$  – соответственно мгновенные значения напряженности магнитного поля и индукции.

Система уравнений для контуров делителя частоты и уравнения намагничивающих сил магнитопроводов позволяют получить следующее уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре делителя частоты

$$\frac{d^2(\beta b_A - \beta b_B)}{d\tau^2} + 2g_* \frac{d(\beta b_A - \beta b_B)}{d\tau} + (\text{sh}\beta b_A - \text{sh}\beta b_B) \frac{1}{K} = 0, \quad (1)$$

где  $2g_* = g/\omega C_K$ ;  $K = 2w_2^2 C_K q \omega^2 / \alpha \beta l_{cp}$ ;  $\tau = t\omega$ ;  $q$  – площадь поперечного сечения сердечника;  $l_{cp}$  – длина средней силовой линии;  $\omega$  – половинная частота.

На границе возбуждения колебаний половинной частоты  $b_A = b_B$  и поэтому задача выявления условий возбуждения заключается в исследовании устойчивости нулевого решения дифференциального уравнения (1), которое при малом возмущении  $\Delta b = b_A - b_B$  сводится к уравнению

$$\frac{d^2\beta\Delta b}{d\tau^2} + 2g_* \frac{d\beta\Delta b}{d\tau} + \frac{\beta\Delta b}{K} \text{ch}\beta b = 0,$$

а подстановкой  $\Delta b = \eta e^{-g_*\tau}$  к виду

$$\frac{d^2\eta}{d\tau^2} + \left[ -g_*^2 + \frac{1}{K} \text{ch}\beta b \right] \eta = 0.$$

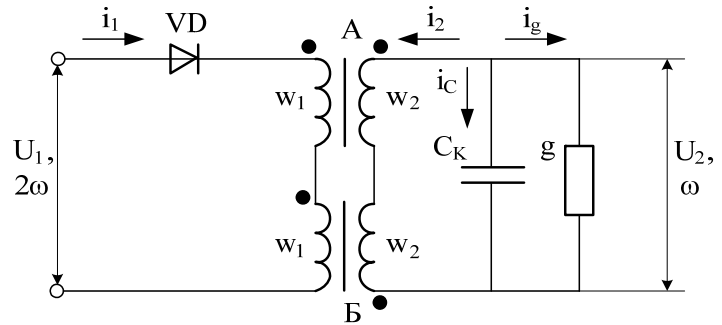


Рис. 2. Схема делителя частоты с вентилем в цепи питания

Перед возникновением параметрических колебаний индукция в сердечниках принята в виде

$$b = B_1 \sin 2\tau + B_0, \quad (2)$$

где  $B_1$  – амплитуда основной гармоники индукции;  $B_0$  – постоянная составляющая индукции.

Связь между амплитудой переменной и постоянной составляющей индукции установлена с учетом того, что перемангничивание сердечников происходит по частному циклу с привлечением экспериментальных данных, полученных на образцах магнитопроводов.

При изменении индукции по (2)  $\text{ch}\beta B_B$  также представляет из себя периодическую функцию, при разложении которой в ряд Фурье получаем

$$\frac{d^2\eta}{d\tau^2} + [\Omega_0 + 2(\Omega_1 \sin 2\tau + \Omega_2 \cos 4\tau + \dots)]\eta = 0, \quad (3)$$

где  $\Omega_0 = \frac{1}{K} \text{ch}\beta B_0 J_0(j\beta B_1) - g_*^2$ ;  $\Omega_1 = \frac{1}{K} \text{sh}\beta B_0 [-jJ_1(j\beta B_1)]$ ;

$\Omega_2 = \frac{1}{K} \text{ch}\beta B_0 J_2(j\beta B_1)$ ;  $J_0(j\beta B_1)$ ,  $-jJ_1(j\beta B_1)$ ,  $J_2(j\beta B_1)$  – функция Бесселя от мнимого аргумента (индексы 0, 1, 2... – порядок функции).

Полученное уравнение с периодически изменяющимся коэффициентом принято называть уравнением Хилла (Хилл Джордж Уильям). Для него известно уравнение линий, разграничивающих области устойчивости и неустойчивости.

Приводимые ниже результаты показали, что для решаемой задачи вполне может использоваться уравнение границы области неустойчивости по первому приближению. Это объясняется тем, что характеристика намагничивания используемых ферромагнитных сердечников имеет высокую степень нелинейности, из-за чего значения коэффициентов  $\Omega_0$ ,  $\Omega_1$ , ... в пределах границы нарушения устойчивости при изменении индукции изменяются в небольшом диапазоне.

Возбуждению колебаний с частотой, равной половине частоты первой гармоники периодического коэффициента уравнения (3), соответствует первая область неустойчивости, уравнение границы которой имеет вид

$$(\Omega_0 - 1)^2 + 2(\Omega_0 + 1)g_*^2 + g_*^4 = \Omega_1^2. \quad (4)$$

Так как естественные потери в колебательном контуре малы и делитель частоты в роли ИКТ работает на чисто реактивную нагрузку, практически может быть оправдан неучет потерь (учет влияния потерь приведен ниже).

При  $g_* = 0$  уравнение для определения амплитуды индукции  $B_1$  на границе неустойчивости имеет вид

$$\text{ch}\beta B_0 J_0(j\beta B_1) \pm \text{sh}\beta B_0 [-jJ_1(j\beta B_1)] = K. \quad (5)$$

Результаты расчетов по (5) и их сопоставление с опытными данными приведены на рис. 3.

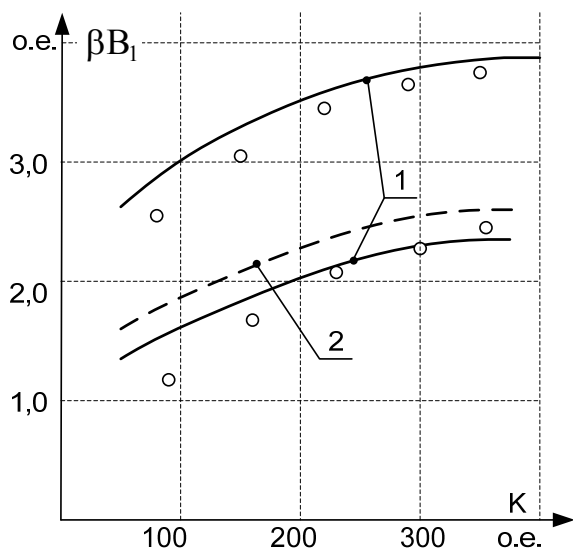


Рис. 3. Амплитуда индукции на границах возникновения колебаний половинной частоты: 1 – по первому приближению; 2 – по нулевому приближению; ○ ○ ○ – опытные данные

ние  $g_{*max}$  меньше единицы, то в (4) можно положить  $g_*^4 = 0$ , что дает  $g_{*max} = \Omega_1/2$ . Показано, что условия возбуждения практически не изменяются при значении  $g_* \leq 0,2$ .

Переход от значений индукции на границах возбуждения колебаний к напряжению источника питания выполнен путем линеаризации цепи возбуждения по первым гармоникам тока и напряжения, что позволило представить эту цепь в виде последовательно соединенных активного сопротивления и индуктивности, зависящей от  $B_1$ . Расчетные и опытные данные для одного из образцов делителя частоты, представленные на рис. 4, дают также объяснение очень важному положительному свойству делителя частоты с диодом в цепи питания, которое заключается в том, что ослабляется влияние изменения напряжения питания на условия возбуждения колебаний половинной частоты.

Получение необходимых расчетных соотношений в стационарном режиме деления частоты представляет из себя более сложную задачу, так как намагничивание нелинейных магнитопроводов определяется тремя составляющими индукции

$$b_A = B_0 + B_1 \sin(2\tau + \varphi) + B_2 \sin \tau; \quad b_B = B_0 + B_1 \sin(2\tau + \varphi) - B_2 \sin \tau, \quad (6)$$

где  $B_2$  - амплитуда индукции половинной частоты.

Показано, что эту задачу можно значительно упростить, если определять только максимально возможное значение амплитуды колебаний половинной частоты в области стационарных режимов. Эффективным при такой постановке оказался метод коллокации. Принимая решение уравнения (1) в виде (6) для трех точек коллокации  $\tau = \pi/2$ ,  $\tau = \pi/4$ ,  $\tau = -\pi/4$ , получим

$$\frac{\beta B_2}{\text{sh} \beta B_2} = \frac{1}{K} \text{ch} Q_1; \quad (7)$$

Как показали исследования и опыт практическое значение имеет также условие, введенное и названное нами нулевым приближением, в виде  $\Omega_0 = 1$ . Коэффициент  $\Omega_0$  есть отношение среднего за период квадрата собственной частоты колебательного контура к  $\omega^2$  и поэтому условие  $\Omega_0 = 1$  отражает тот факт, что параметрические колебания являются свободными, так как вынуждающая сила с частотой  $\omega$  в колебательном контуре отсутствует.

Условие  $\Omega_0 = 1$  позволило также оценить максимально возможное значение относительной активной проводимости  $g_{*max}$  из условия возбуждения колебаний. Так как ожидаемое значение

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\beta B_2}{\operatorname{sh} \frac{\sqrt{2}}{2} \beta B_2} = \frac{1}{K(1-2g_*)} \operatorname{ch} Q_2; \quad \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\beta B_2}{\operatorname{sh} \frac{\sqrt{2}}{2} \beta B_2} = \frac{1}{K(1+2g_*)} \operatorname{ch} Q_3; \quad (8)$$

где  $Q_1 = \beta V_0 - \beta V_1 \sin \varphi$ ;  $Q_2 = \beta V_0 + \beta V_1 \cos \varphi$ ;  $Q_3 = \beta V_0 - \beta V_1 \cos \varphi$ .

Из (7) следует, что максимальное значение амплитуды индукции половинной частоты имеет место при  $Q_1 = 0$ . Расчетные и экспериментальные значения  $\beta B_{2\text{макс}}$  при таких условиях близки друг к другу (рис. 5).

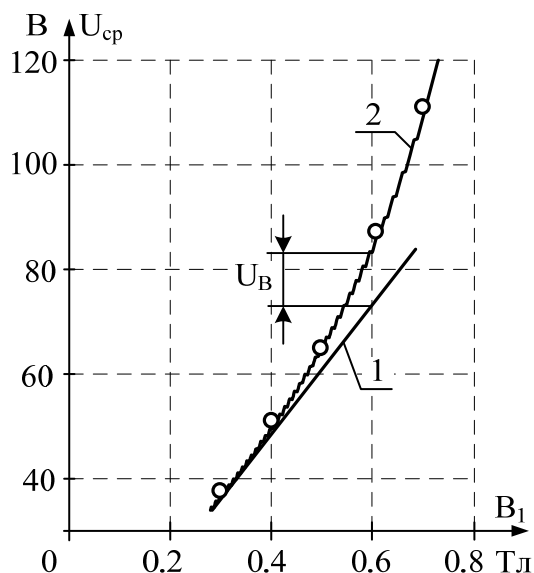


Рис. 4. К определению напряжения на вентиле на границах возникновения колебаний половинной частоты: 1 – напряжение на обмотке; 2 – напряжение, приложенное к цепи; ○ ○ ○ – эксперимент

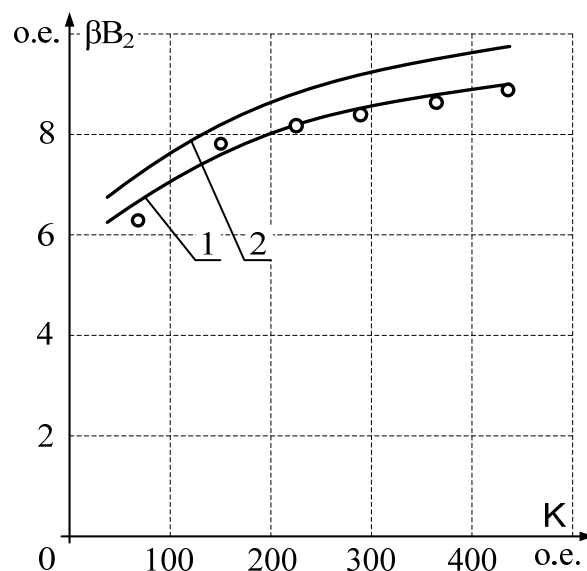


Рис. 5. Амплитуда индукции субгармоники определенная: 1 – методом коллокации; 2 – методом гармонического баланса и по нулевому приближению условия устойчивости стационарного режима; ○ ○ ○ – эксперимент

Так как максимальное значение амплитуды субгармоники имеет место при  $Q_1 = 0$ , а  $Q_1$  определяется составляющими  $V_0$  и  $V_1$ , сделано предположение, что в стационарном режиме электромагнитное состояние делителя частоты в основном определяется субгармонической составляющей индукции. Для проверки этого предположения определена амплитуда субгармоники методом гармонического баланса и по нулевому приближению условия устойчивости стационарного режима ( $\Omega_0 = 1$ ) при задании индукции в виде

$$b_A = B_2 \sin \tau \text{ и } b_B = -B_2 \sin \tau.$$

Значения  $B_2$ , определенные при таких условиях, также близки к опытным данным. Таким образом для практических целей соотношения между параметрами делителя частоты и амплитудой субгармоники могут быть установлены с учетом влияния на электромагнитный режим только субгармонической составляющей.

Соотношения (8) позволили оценить максимальное значение относительной активной проводимости из условия существования стационарного режима. Полученное предельное значение  $g_*$  из условия существования стационарного режима несколько больше предельного значения из условия возникновения ко-

лебаний и поэтому не является расчетным.

Практически важным является также то, что соотношения (8) позволили установить зависимость угла  $\varphi$  в (6) от значения  $g_*$  и благодаря этому получить связь между действующими значениями токов в контурах делителя частоты. При малой активной нагрузке  $I_1 w_1 = (0.4 \div 0.5) I_2 w_2$ , при нагрузке близкой к предельной  $I_1 w_1 = I_2 w_2$ , а ток в колебательном контуре ( $I_2$ ) в полученных соотношениях при известной индукции  $B_2$  определяется очевидным соотношением:

$$I_2 = \frac{B_2}{\sqrt{2}} 2q w_2 \omega \sqrt{(\omega C_K)^2 + g^2}.$$

Для включения делителя в цепь нейтрали на магнитопроводы наносятся выходные обмотки  $w_3$ , соединенные согласно с обмоткой колебательного контура (рис. 6). Напряжение выходной обмотки определяется из условия обеспечения заданного контрольного тока  $I_{25}$  при металлическом замыкании

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{ном}} I_{25}}{2\sqrt{3} \cdot I_{\text{дгр}}},$$

где  $U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение электроустановки.

Площадь поперечного сечения провода обмотки  $w_3$  принимается по термической стойкости к полному току ДГР.

Основными особенностями условий работы делителя частоты, работающего в качестве ИКТ, является следующее:

1) делитель частоты работает практически на чисто реактивную нагрузку, которая может иметь как емкостный, так и индуктивный характер;

2) в установившемся режиме замыкания на землю по выходным обмоткам протекает ток ДГР с частотой 50 Гц.

В соответствии с назначением ИКТ и требованиями, предъявляемыми к нему, напряжение половинной частоты при этих условиях практически не должно изменяться.

При отсутствии замыкания в сети реактивное сопротивление нагрузки ИКТ, отнесенное к сопротивлению ДГР имеет емкостный характер и равно  $x_{\text{нагр}*} = j(4\nu - 3)$ , а при устойчивом замыкании  $x_{\text{нагр}*} = 1$  и имеет индуктивный характер ( $\nu$  - расстройка компенсации).

Емкостная нагрузка увеличивает коэффициент  $K$ , то есть смещает режим работы в сторону больших индукций  $\beta B_1$ , а индуктивная наоборот в сторону меньших значений индукции. Это приводит к некоторому сужению области возбуждения колебаний половинной частоты. Емкостная и индуктивная нагрузка приводит также к изменению напряжения половинной частоты.

От допускаемой степени влияния знакопеременной реактивной нагрузки зависит требуемый объем магнитопроводов делителя частоты. Полученные ко-

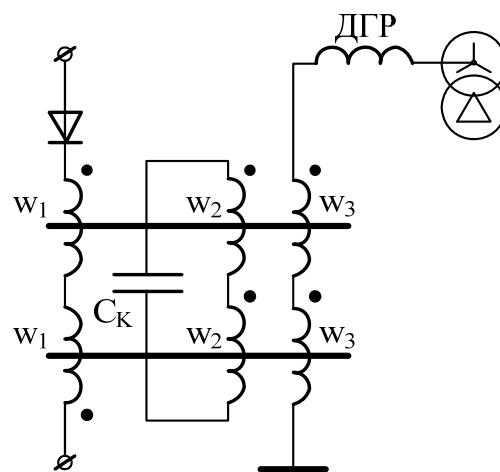


Рис. 6. Схема включения делителя частоты в цепь ДГР

личественные оценки позволили обосновать ее значение, при котором область индукции основной частоты по условию возбуждения колебаний уменьшается не более чем на 15 %, а изменение напряжения половинной частоты не превышает 5 %.

Влияние тока ДГР, протекающего по выходным обмоткам делителя частоты, может быть рассмотрено на основе схемы замещения рис. 7., т.к. относительно зажимов выходной обмотки делитель частоты можно представить как трансформатор, нагруженный на емкостное сопротивление конденсатора колебательного контура.

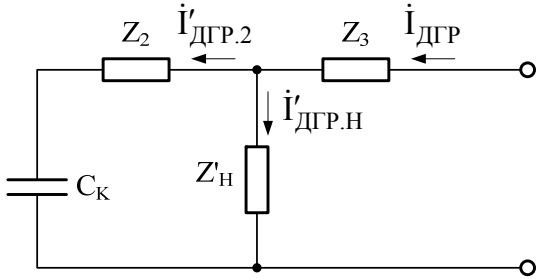


Рис. 7. Схема замещения делителя частоты относительно зажимов выходной обмотки

Для оценки влияния на работу делителя тока  $I'_{ДГР.Н}$ , ответвляющегося в ветвь намагничивания, характеристика намагничивания принята в виде:

$$b = \alpha h - \beta h^3,$$

что позволило получить для амплитуды напряженности половинной частоты следующее выражение:

$$H_2^2 = \frac{4\alpha}{3\beta} - X - 2H_1^2 - 2H_L^2 - 4H_0^2 \pm 3\sqrt{H_0^2 H_1^2 - R^2}, \quad (9)$$

где  $H_1$ ,  $H_L$  и  $H_2$  – амплитуды напряженности магнитного поля, создаваемые соответственно переменной составляющей тока возбуждения, током ДГР и током половинной частоты;  $H_0$  – постоянная составляющая напряженности магнитного поля,  $\varphi_L$  – фаза тока ДГР,  $X = \frac{I_{cp}}{\beta 2q w_2^2 \omega^2 C_K}$ ,  $R = \frac{I_{cp} r_2}{3\beta 2q w_2^2 \omega}$ .

Из (9) следует, что протекание тока ДГР по выходным обмоткам делителя частоты приводит к снижению амплитуды колебаний половинной частоты, а при  $2H_L^2 > \frac{4\alpha}{3\beta} - X - 2H_1^2 - 4H_0^2 \pm 3\sqrt{H_0^2 H_1^2 - R^2}$  процесс деления частоты нарушается. Таким образом, существует некоторая предельная по абсолютному значению напряженность магнитного поля  $H_L = H_{пр}$ , при которой еще возможна нормальная работа делителя частоты.

Амплитуда напряженности магнитного поля  $H_L$  связана с конструктивными параметрами делителя частоты следующим образом:

$$H_L = k_p \sqrt{2} I_{ДГР} w_3 / I_{cp}, \quad (10)$$

где  $k_p = I'_{ДГР.Н} / I_{ДГР}$  – коэффициент распределения токов в схеме рис. 7.

Выражая в (10) число витков выходной обмотки через индукцию  $B_2$  и требуемый при металлическом замыкании контрольный ток  $I_{25}$ , можно выделить выражение для требуемого объема магнитопровода при  $H_L = H_{пр}$

$$V = 2I_{cp}q = \frac{k_p U_{ном} I_{25}}{\sqrt{3}\omega B_2 N_{ГР}}. \quad (11)$$

Для определения  $N_{ГР}$  привлечены дополнительные экспериментальные данные о количественном влиянии тока ДГР на амплитуду субгармонических колебаний. В качестве меры этого влияния принято отношение напряжения (или соответствующей индукции) с частотой 50 Гц, которое наводится в колебательном контуре током ДГР, к напряжению с частотой 25 Гц. Предельное значение этой величины принято в пределах  $0,08 \div 0,1$ , так как при этом напряжение половинной частоты практически не снижается.

Объем магнитопроводов делителя частоты должен также удовлетворять условию работы на реактивную нагрузку при замыкании на землю.

$$V = \frac{U_{ном} I_{25}^2}{\sqrt{3} I_{ДГР} K \alpha \beta V_2^2 3 C_{н*} \omega}, \quad (12)$$

где  $C_{н*} \omega$  - проводимость нагрузки, отнесенная к проводимости конденсатора колебательного контура.

Наибольший расчетный объем по (12) получается для сети 10 кВ с наименьшим емкостным током равным 20 А, при котором устанавливается ДГР.

Однако из условия сохранения режима работы делителя частоты при протекании по выходной обмотке тока ДГР по (11) требуется значительно больший объем (более чем в 20 раз).

Для снижения требуемого объема магнитопроводов по (11) до значения по (12) единственным возможным способом является уменьшение коэффициента распределения  $k_p$  в (11).

Радикальным и комплексным решением, позволившим в конечном счете создать ИКТ приемлемых габаритов и стоимости, явилась замена конденсатора колебательного контура цепью, состоящей из последовательно соединенных конденсатора и линейного дросселя. Эта цепь должна быть настроена в резонанс при частоте 50 Гц, а при частоте 25 Гц ее сопротивление должно остаться таким же, каким оно было до изменения схемы делителя частоты. Эти условия совмещаются при следующих значениях емкости колебательного контура и индуктивности дросселя

$$C_K = \frac{3}{4} C_{Э}, \quad L_D = \frac{1}{3\omega^2 C_{Э}},$$

$C_{Э}$  – емкость, удовлетворяющая требуемым условиям работы делителя частоты в соответствии с принятым значением  $K$ .

При этом показано, что  $k_p = \frac{1}{3D}$ , где  $D$  – добротность дополнительного дросселя при частоте 50 Гц, в то время как в исходной схеме  $k_p = 1/3$ .

Чтобы расчетный объем по (11) не превышал минимально необходимый по (12), значение добротности должно удовлетворять условию



$$D > \frac{I_{\text{ДГР min}} K \alpha \beta V_2 3 C_{\text{H}^*}}{3 N_{\text{пр}} I_{25}}$$

При контрольном токе  $I_{25} = 1 \text{ А}$  требуется  $D \geq 20$ . При таком выборе размеров магнитопровода должна оставаться постоянной величина  $\frac{I_{\text{ДГР}} W_3}{U_{\text{НОМ}}}$ . Поэтому ИКТ

для электроустановок с различными емкостными токами отличаются друг от друга только числом витков и площадью поперечного сечения провода выходной обмотки. Значения контрольного тока, обеспечиваемого разработанными и применяемыми на практике ИКТ для режима длительного замыкания, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номинальное напряжение, кВ	6,3	10,5	13,8	15,75
Контрольный ток, А	1,83	1,12	0,85	0,75

За счет принятых изменений схемы делителя частоты одновременно выполняется также условие отсутствия влияния ИКТ на режим нейтрали, так как относительно выходной обмотки он замкнут на малое активное сопротивление дросселя и обмотки колебательного контура.

В приложении к диссертации приводится расчет и проектирование ИКТ. При этом получено хорошее совпадение расчетных и фактически полученных параметров источника.

Напряжение питания, при котором возникает устойчивый режим деления частоты, составляет  $190 \div 195 \text{ В}$  и при его увеличении до  $250 \text{ В}$  напряжение с частотой  $25 \text{ Гц}$  уменьшается не более чем на  $1\%$ , а ток потребляемый от сети изменяется от  $2,25 \text{ А}$  до  $2,8 \text{ А}$ .

Сопротивление на частоте  $50 \text{ Гц}$  относительно зажимов выходной обмотки с учетом ее собственного полного сопротивления составляет не более  $0,5\%$  от сопротивления ДГР.

Элементы ИКТ – электромагнитная часть делителя частоты и дроссель в зависимости от условий применения выполняются либо маслонаполненными в отдельных баках, либо в сухом исполнении (рис. 8).

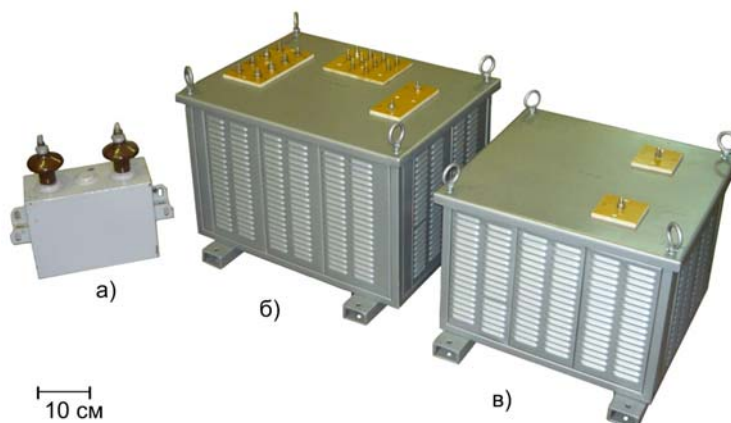


Рис. 8. Источник контрольного тока в сухом исполнении: а) конденсатор; б) делитель частоты; в) дроссель

**Глава 2** посвящена разработке защиты от замыканий на землю в электрических сетях с компенсацией емкостного тока.

Основная задача, которая решается в данной части работы – это выявление и обеспечение условий совместимости функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях в сети с компенсацией

емкостного тока. При устойчивых замыканиях работа защиты обеспечивается за счет наложения контрольного тока с частотой 25 Гц.

При использовании для работы защиты при устойчивых замыканиях контрольного тока с частотой ниже промышленной исходным фактором, благодаря которому может быть обеспечена совместимость условий работы защиты при устойчивых и при дуговых перемежающихся замыканиях, является то, что в сети с компенсацией емкостного тока частота пробоев изоляции при перемежающихся замыканиях значительно ниже промышленной частоты и может лежать в пределах от нескольких герц до  $10 \div 12$  Гц. В результате этого токи и напряжения нулевой последовательности также содержат гармонические составляющие с частотой ниже промышленной. Фактическая частота этих гармоник и их амплитуда зависят от характера перемежающегося замыкания, параметров элементов электрической сети, расстройки компенсации и т.п. Также важно и распределение токов гармонических составляющих по элементам сети.

Для исследования закономерностей формирования низкочастотных гармоник рассмотрена возможная степень идеализации схемы замещения сети. На стадии горения дуги происходит разряд емкости поврежденной фазы и дозаряд емкостей неповрежденных фаз. Переходные емкостные токи при этих процессах в общем случае имеют сложный многочастотный характер. Переходный процесс разряда емкости поврежденной фазы определяется параметрами контуров, образованных индуктивностью и активным сопротивлением одной фазы линий сети. Индуктивность этих контуров мала и поэтому резонансная частота контуров разряда составляет от нескольких десятков до нескольких сотен кГц. Из-за сильного проявления поверхностного эффекта в проводящих элементах на пути тока замыкания эквивалентное активное сопротивление получается большим, и поэтому можно принять, что ток разряда имеет апериодический характер. Токи дозаряда емкостей неповрежденных фаз замыкаются через источники питания, например, питающий сеть трансформатор. Поэтому и резонансная частота контуров дозаряда составляет несколько кГц. При такой частоте процесс может иметь характер затухающих колебаний.

Вполне определенным основанием для упрощения схемы замещения для стадии, когда протекают переходные емкостные токи, является то обстоятельство, что операция фильтрации в области низких частот для выделения низкочастотных гармоник близка к операции определения интеграла тока за время между двумя соседними пробоями изоляции. Это объясняется тем, что период первой гармоники, определяемый частотой пробоев, значительно больше времени существования переходных емкостных токов и может составлять примерно от 0,25 до 0,05 с. Время существования тока дозаряда при его частоте, например 3 кГц, соответственно до первого, второго и третьего прохождения тока через ноль составляет 0,15; 0,3; 0,45 мс, а тока разряда емкости поврежденной фазы еще значительно меньше.

Вольтамперные характеристики всех элементов схемы замещения приняты линейными и поэтому гармонические составляющие токов нулевой последовательности определяются суммированием гармонических составляющих токов на отдельных стадиях дугового перемежающегося замыкания.

Амплитуды гармонических составляющих процесса от токов на стадии горения дуги, когда протекают переходные емкостные токи:

$$\dot{I}_k = \frac{2}{T_1} \int_{t_1}^{t_2} i_c(t) e^{jk\omega_1 t} dt, \quad (13)$$

где  $i_c(t)$  – переходный емкостный ток;  $\omega_1$  и  $T_1$  – частота и период первой гармоники процесса при дуговом перемежающемся замыкании;  $k$  – номер гармоники;  $t_2 - t_1$  – отрезок времени в течение которого мгновенные значения переходного емкостного тока имеют существенные значения.

В области низких частот  $t_2 - t_1 \ll T_1$  и поэтому в (13) можно принять  $e^{jk\omega_1 t} \approx 1$  и следовательно:

$$\dot{I}_k \approx \frac{2}{T_1} \int_{t_1}^{t_2} i_c(t) dt. \quad (14)$$

Интеграл в (14) есть изменение заряда емкостей фаз сети за время горения дуги, которое определяется изменением напряжения на них. Для выявления наиболее существенных закономерностей примем на данном этапе, что после каждого очередного пробоя изоляции (зажигания дуги) переходный процесс разряда емкости поврежденной фазы и дозаряда емкостей неповрежденных фаз полностью заканчивается. При этом изменение напряжения на поврежденной фазе равно пробивному напряжению ( $U_{пр}$ ). Если не учитывать в первом приближении влияние междуфазных емкостей, то изменение напряжения на неповрежденных фазах также будет равно пробивному напряжению (влияние междуфазных емкостей далее учитывается понижающим коэффициентом, как это обычно принято при исследовании дуговых перенапряжений).

После завершения процессов разряда и дозаряда полное изменение заряда емкостей фаз линии, фиксируемое формированием интеграла тока нулевой последовательности будет равно:

$$\Delta Q_\Sigma = 3C_\phi U_{пр} \lambda.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что на амплитуды низкочастотных гармоник, порождаемых на стадии горения дуги, характер изменения переходного тока оказывает слабое влияние. Это дает основание значительно упростить схему замещения, принимая контуры разряда емкости поврежденной фазы и дозаряда емкостей неповрежденных фаз как контуры второго порядка с определенными значениями резонансной частоты и коэффициента затухания.

После погасания дуги накопившийся на емкостях фаз суммарный избыточный заряд стекает через ДГР в виде затухающих колебаний с собственной частотой, близкой к промышленной и зависящей от расстройки компенсации и коэффициента демпфирования  $d$ , который определяется как отношение суммарной активной проводимости фаз сети и ДГР к суммарной емкостной проводимости сети на промышленной частоте.

$$\omega_{ст} = \omega_{п} \sqrt{(1 - \upsilon) - \left(\frac{d}{2}\right)^2}.$$

При такой частоте продольные параметры отдельных линий и параметры источников питания сети на процесс стекания избыточных зарядов практически влияния не оказывают.

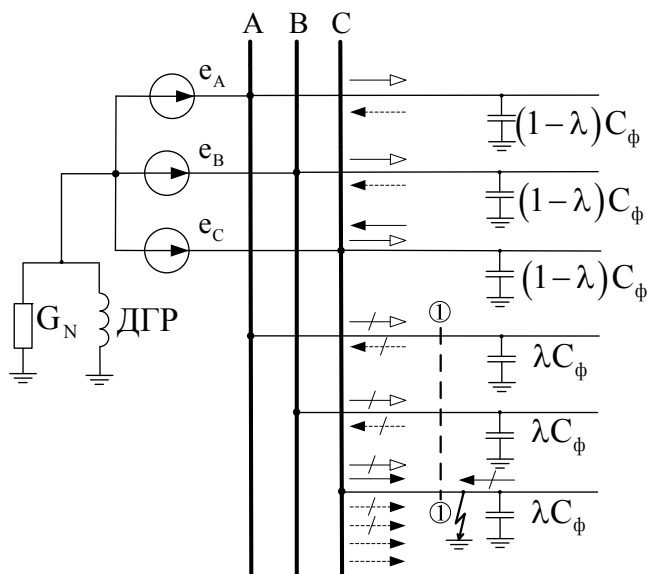


Рис. 9. Токи, обусловленные изменением зарядов фаз сети при дуговом замыкании:

→, —→ — токи разряда; - - - →, - - - → — токи дозаряда; ···→, ···→ — токи стекания избыточных зарядов с емкостей фаз после обрыва дуги соответственно в поврежденной и неповрежденной линиях

ствия будет обладать свойством, близким к свойству абсолютной селективности.

Это свойство в значительной степени сохраняется при замене точного интегрирования фильтрацией в области низких частот. При этом автоматически обеспечивается совместимость действия защиты при перемежающихся замыканиях и при устойчивых замыканиях.

Для выявления основных особенностей частотных спектров токов нулевой последовательности и факторов, которые могут оказывать влияние на амплитуды низкочастотных гармонических составляющих, переходные токи разряда и дозаряда емкостей фаз сети приняты в виде:

$$i_p = \frac{k_{п} U_{пр} \omega_p^2 C_{\phi}}{p_1 - p_2} \cdot \left[ e^{-p_1(t-t_{пр})} - e^{-p_2(t-t_{пр})} \right],$$

$$i_d = k_{п} \left[ \frac{2U_{пр} \omega_d^2 C_{\phi}}{\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}} \cdot e^{-\delta_d \cdot (t-t_{пр})} \cdot \sin \left[ \left( \sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2} \right) \cdot (t-t_{пр}) \right] + i_{\infty} \right] (1 - k_c),$$

где  $k_{п}$  — коэффициент, определяющий долю тока протекающего в месте установки защиты (сечение 1-1) (при замыкании на защищаемой линии  $k_{п} = 1 - \lambda$ , а

Существенным является учет направлений токов на различных стадиях перемежающегося замыкания, которые показаны на рис. 9.

При условии полного стекания избыточных зарядов в бестоковую паузу изменение заряда емкостей фаз, фиксируемое как интеграл тока нулевой последовательности, на неповрежденной линии будет равно нулю, а на поврежденной (в сечении 1-1) — суммарному изменению заряда емкостей фаз всей сети.

Таким образом, если реализовать формирование и фиксацию интеграла тока нулевой последовательности за время между двумя соседними пробоями изоляции, то защита по принципу дей-

при замыкании в сети на других линиях  $k_{\Pi} = \lambda$ );  $t_{\text{пр}}$  – текущее время в момент пробоя;  $p_1, p_2$  – корни характеристического уравнения для процесса разряда емкости поврежденной фазы;  $\omega_d$  и  $\delta_d$  – резонансная частота и коэффициент затухания процесса дозаряда емкостей неповрежденных фаз;  $i_{\infty}$  – принужденный ток;  $(1 - k_c)$  – коэффициент, учитывающий влияние междуфазных емкостей.

После погасания дуги избыточные заряды фаз сети выравниваются и на нейтрали сети устанавливается напряжение  $u_{N\Gamma}$ , определяющее начальные условия процесса стекания избыточных зарядов.

Дополнительно к принятым выше расчетным условиям для выявления основных особенностей частотных спектров токов нулевой последовательности принят такой вид дуги, когда она гаснет при прохождении через ноль переходного емкостного тока. В этом случае  $u_{N\Gamma}$  и ток стекания равны:

$$u_{N\Gamma} = U_{\text{пр}} e^{-\delta(t_r - t_{\text{пр}})} \left[ \cos\left(\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}\right)(t_r - t_{\text{пр}}) + \frac{\delta_d}{\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}} \cdot \sin\left(\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}\right)(t_r - t_{\text{пр}}) \right] + u_{N\infty};$$

$$i_{\text{ст}} = -\lambda u_{N\Gamma} e^{-\frac{d}{2}\omega_n(t-t_r)} \cdot 3C_{\phi}\omega_{\text{ст}} \sin[\omega_{\text{ст}}(t - t_r)].$$

Период процесса при дуговом перемежающемся замыкании оценивается условием  $U_{\text{пр}} = U_{\text{ог}}$ , где  $U_{\text{ог}}$  – огибающая амплитуд восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе

$$U_{\text{ог}} = E_{\text{фм}} \cdot \sqrt{1 + e^{-d\omega_n t} - 2e^{-\frac{d}{2}\omega_n t} \cos(\omega_{\Pi} - \omega_{\text{ст}})t}.$$

Пределы интегрирования для разрядного тока приняты от момента пробоя  $t = t_{\text{пр}}$  до  $t = \infty$ , а для дозарядного тока – от  $t = t_{\text{пр}}$  до момента погасания дуги  $t_r$  при одном из  $n$ -ых прохождений через ноль дозарядного тока:

$$t_r = t_{\text{пр}} + \frac{\pi n}{\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}}.$$

В соответствии с допущением (14):

$$I_{\text{кр}} \approx \frac{2}{T_1} \int_{t_{\text{пр}}}^{\infty} i_p dt; \quad I_{\text{кд}} \approx \frac{2}{T_1} \int_{t_{\text{пр}}}^{t_r - t_{\text{пр}}} i_d dt. \quad (15)$$

Для стадии стекания избыточных зарядов пределы интегрирования принимаются от момента погасания дуги до момента следующего пробоя.

Расчетные амплитудно-частотные спектры токов нулевой последовательности для одной из реализаций перемежающегося замыкания приведены на рис. 10. В расчете принято  $\lambda = 0,5$ , так как в этом случае качественное и коли-

качественное различие спектров определяется только принципиальными особенностями распределения токов по ветвям схемы сети.

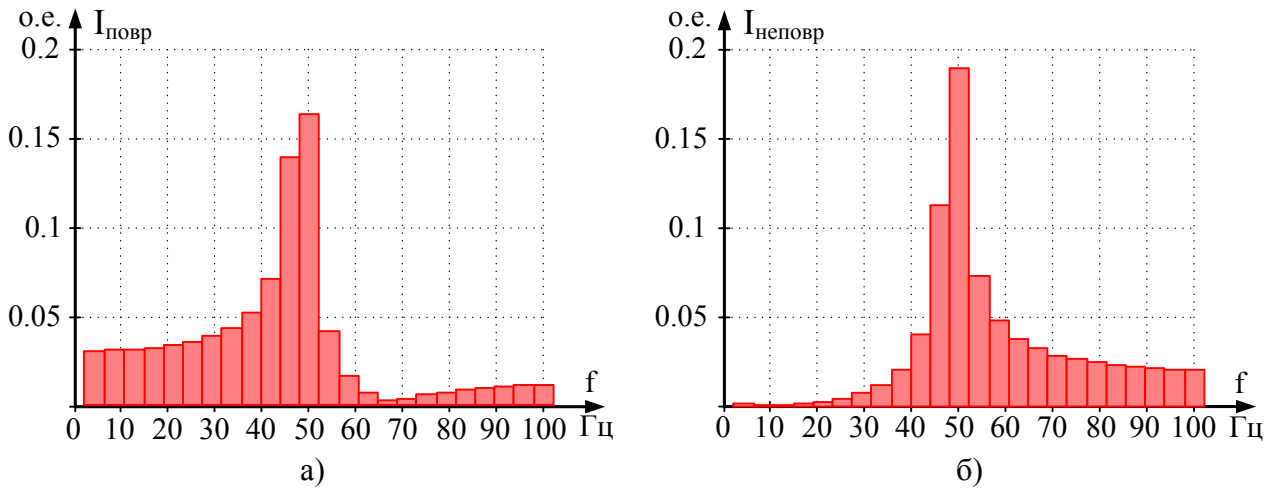


Рис. 10. Амплитудно-частотные спектры тока нулевой последовательности, при  $\lambda = 0,5$ ;  $\nu = 0,06$  и  $d = 0,05$ ;  $n = 1$ ;  $U_{пр} = 0,9U_{фм}$ : а) поврежденная линия; б) неповрежденная линия.

Амплитуды гармоник отнесены к амплитуде емкостного тока при устойчивом замыкании

Наиболее существенные особенности амплитудно-частотных спектров заключаются в следующем:

1. Наибольшую амплитуду имеют гармоники с частотами близкими к частоте тока стекания избыточных зарядов, которая при возможных расстройках компенсации (до  $\pm 0,2$ ) близка к промышленной частоте. Амплитуды гармоник с такими частотами практически одинаковы в поврежденной и неповрежденной линиях (при  $\lambda = 0,5$ ).

2. Амплитудно-частотные спектры имеют две характерные области. При частотах ниже промышленной, амплитуды гармоник в поврежденной линии больше амплитуд гармоник в неповрежденной линии. При частотах выше промышленной, наоборот, амплитуды гармоник неповрежденной линии больше амплитуд гармоник поврежденной линии.

Эти качественные особенности спектров сохраняются при возможном многообразии параметров, влияющих на процессы при перемежающихся замыканиях. Однако некоторые из них, в частности момент погасания дуги, коэффициент затухания и пробивное напряжение, могут существенно влиять на количественные характеристики спектров. Для оценки влияния этих факторов учитывается, что особенности изменения мгновенных значений разрядного и дозарядного токов не зависят от периода следования пробоев. Поэтому анализ влияния момента погасания дуги и коэффициента затухания можно вести через спектральные функции, определяемые разрядным и дозарядным токами, с учетом допущения (14)

$$F_p = k_{п} U_{пр} C_{ф}; \quad F_d = 2k_{п} U_{пр} C_{ф} (1 - e^{-\delta_d \cdot \frac{\pi}{\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}} \cdot n} \cdot \cos(n \cdot \pi)).$$

В реальном диапазоне изменения коэффициента затухания спектральная плотность изменяется примерно в два раза (рис. 11).

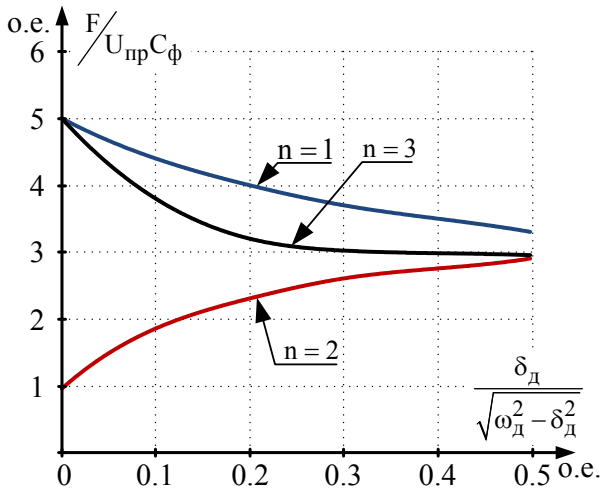


Рис. 11. Зависимость спектральной функции  $F$ , отнесенной к величине  $C_{\phi} U_{\text{пр}}$ , от относительного значения коэффициента затухания и момента гашения дуги

имеет место эффект стабилизации амплитуд низкочастотных гармоник. Так при некоторых конкретных условиях и при изменении относительного пробивного напряжения от  $0,5$  до  $1 U_{\text{фм}}$ , то есть в 2 раза, амплитуды гармоник изменяются примерно в 1,3 раза (рис. 12).

Таким образом механизм формирования низкочастотных гармоник при перемежающихся замыканиях таков, что их амплитуды в поврежденной линии всегда больше, чем в неповрежденной. Однако это не означает, что правильная работа защиты, реагирующей на уровень низкочастотных гармоник, может быть обеспечена во всех случаях.

Для обеспечения чувствительности при устойчивых замыканиях ток срабатывания на частоте 25 Гц должен быть согласован с контрольным током, значение которого ограничено возможностями ИКТ. Поэтому не исключено, что при внешних замыканиях, начиная с некоторого значения емкости фаз защищаемого присоединения, уровень низкочастотных гармоник может превысить установленный уровень срабатывания. Возможна также и обратная ситуация, когда при внутренних замыканиях и некоторых сочетаниях параметров сети и видов перемежающегося замыкания уровень низкочастотных гармоник будет недостаточным для срабатывания.

Сочетание значений параметров, которые влияют на электрические величины при перемежающихся замыканиях, являются случайными.

Весьма существенно, что при этом сохраняется условие компенсации изменения зарядов на неповрежденной линии, так как при изменении момента погасания дуги изменяются не только амплитуды гармоник по (15), но и напряжение  $U_{\text{НГ}}$ .

Изменение пробивного напряжения приводит к пропорциональному снижению спектральной функции и одновременно к уменьшению периода следования пробоев. Так как амплитуды гармоник обратнопропорциональны периоду процесса, то при изменении пробивного напряжения

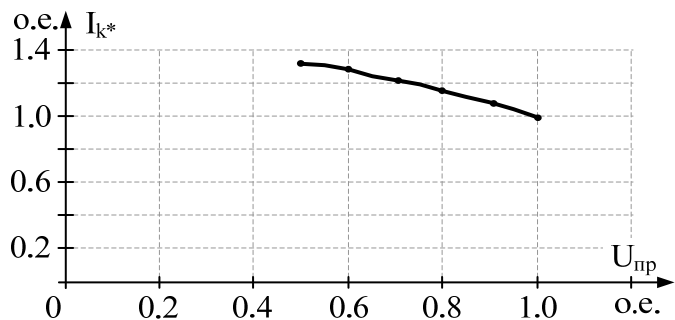


Рис. 12. Зависимость амплитуд низкочастотных гармоник в токе от пробивного напряжения (отнесено к  $U_{\text{фм}}$ )

Для оценки реальной совместимости функционирования защиты в сети с компенсацией емкостного тока при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях проведены исследования с учетом случайного характера процессов при перемежающихся дуговых замыканиях. Как случайные задавались следующие величины: пробивное напряжение; расстройка компенсации; коэффициент демпфирования; частота и коэффициент затухания переходных емкостных токов; момент погасания дуги; коэффициенты, характеризующие скорость и пределы изменения электрической прочности дугового промежутка после погасания дуги.

Факторы, влияющие на перечисленные параметры таковы, что их можно считать практически независимыми. Исследования проведены методом статистических испытаний.

Естественно ожидать, что наибольшая вероятность неправильных действий защиты, определяемая как сумма отказов и излишних срабатываний, будет иметь место на линиях с большим собственным емкостным током в сети со сравнительно небольшим суммарным емкостным током. В качестве расчетного случая для иллюстрации принята сеть с номинальным напряжением 10 кВ и с суммарным емкостным током, равным 20 А. Уровень срабатывания устанавливается таким, чтобы при устойчивом замыкании коэффициент чувствительности к контрольному току с частотой 25 Гц был равен двум.

Результаты этих исследований позволили скоординировать требуемое значение контрольного тока с допускаемой вероятностью неправильных действий защиты. Например, расчетная вероятность неправильных действий на уровне  $1 \div 2\%$  на линиях с собственным емкостным током 10 А получается при контрольном токе не менее 0,8 А в сетях с ручной настройкой компенсации, и не менее 0,6 А в сетях с автоматической настройкой (рис. 13).

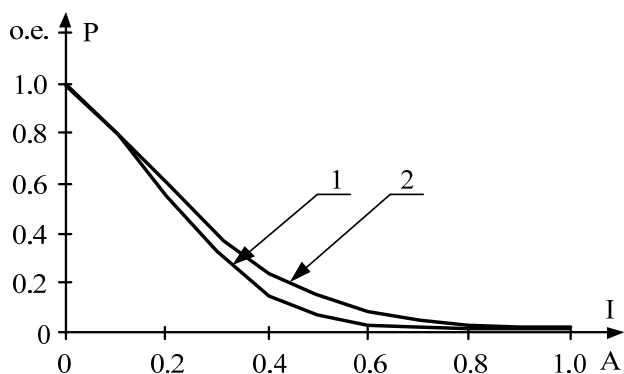


Рис. 13. Вероятность неправильных действий защиты в зависимости от величины контрольного тока с частотой 25 Гц, суммарный емкостный ток сети – 20 А, собственный емкостный ток защищаемой линии 10 А и 15 А: 1 - регулирование ДГР ручное, ступенчатое; 2 - плавное, автоматическое

на землю в обмотке статора генераторов.

В эксплуатации и в проектируемых объектах встречается большое разнообразие схем включения генераторов. В таких условиях не может быть единого

Увеличение вероятности неправильных действий защиты при ступенчатом регулировании ДГР объясняется тем, что при этом в среднем расстройка компенсации больше, что приводит к неполному стеканию избыточных зарядов и к увеличению амплитуд низкочастотных гармоник на неповрежденных линиях. Таким образом требование точной настройки компенсации не противоречит условию селективной работы защиты.

**В главе 3** рассмотрены вопросы разработки защиты от замыканий



технического решения для выполнения защиты от замыканий на землю в обмотке статора, особенно с учетом требования отсутствия зоны нечувствительности при замыканиях вблизи нейтрали.

В настоящее время известны различные принципы выполнения защиты для всех встречающихся на практике схем подключения генераторов. Виды защит, применяемых при различных схемах включения генераторов, показаны на схеме рис. 14, которая предоставлена автору специалистами НПП «ЭКРА». Устройства защиты, выделенные на схеме серой заливкой, разработаны под руководством и непосредственным участием автора.

В данной работе приводятся результаты исследований, относящиеся только к тем устройствам, которые выполняются на базе использования наложения контрольного тока с частотой 25 Гц и низкочастотных гармоник при перемежающихся замыканиях.

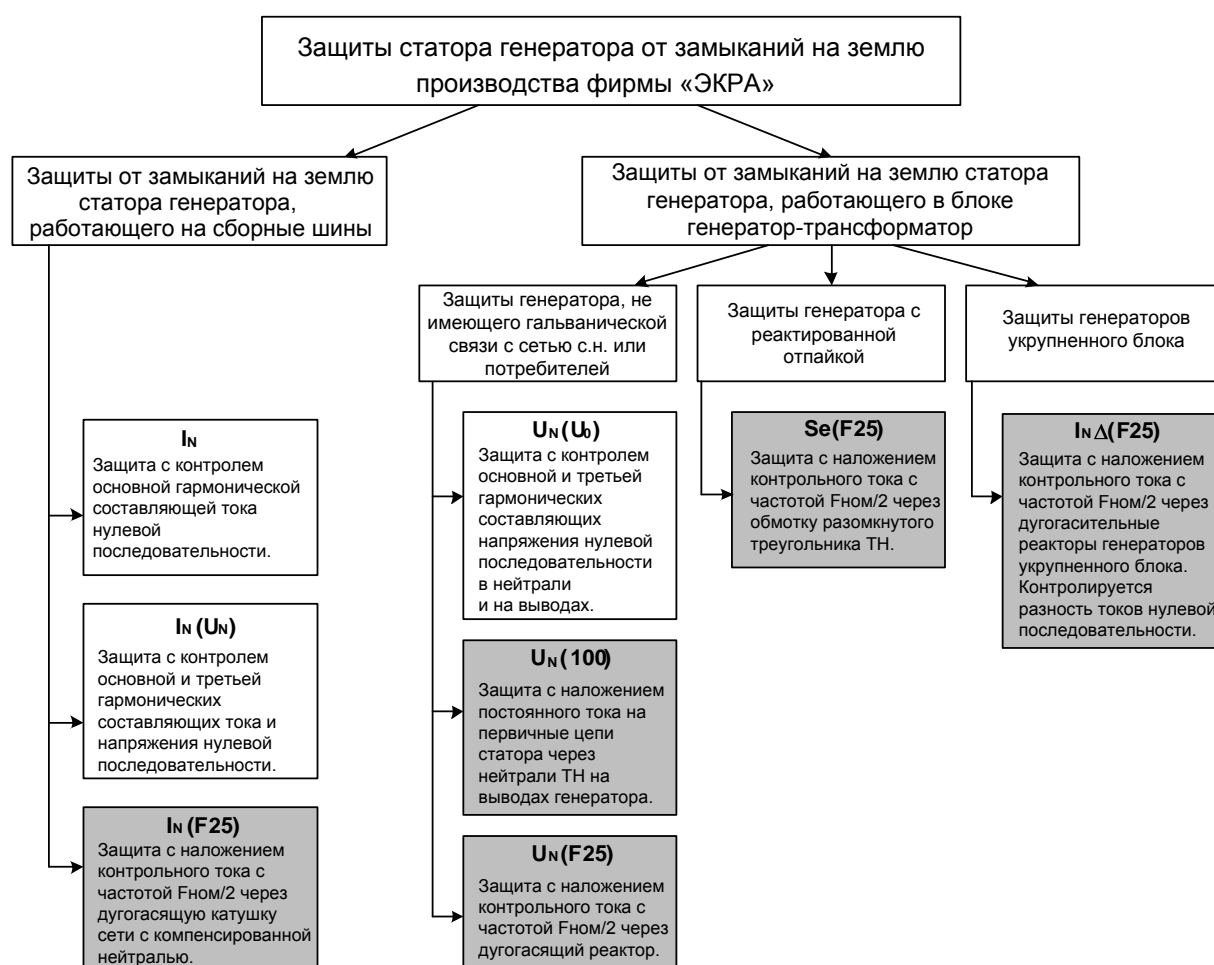


Рис. 14. Виды защит от замыканий на землю в обмотке статора генератора, применяемые НПП «ЭКРА»

#### Защита от замыканий на землю генераторов, работающих на сборные шины в сети с компенсацией емкостных токов.

Практически во всех случаях сети генераторного напряжения имеют значительный емкостный ток замыкания на землю, и поэтому в этих сетях устанавливаются ДГР. Очевидно, что при осуществлении селективной сигнализации замыканий на землю с помощью наложения контрольного тока

можно выполнить и защиту от замыканий на землю генераторов, работающих в той же сети.

Возможность частотной отстройки от тока небаланса позволяет включать токовый измерительный орган защиты к трехтрансформаторному фильтру токов нулевой последовательности или в нулевой провод какой-либо группы трансформаторов тока на выводах генератора. Такая защита охватывает 100 % витков обмотки статора.

Задача отстройки защиты от токов при внешних устойчивых и перемежающихся замыканиях в этом случае значительно облегчается, так как собственный емкостный ток генератора составляет малую долю от емкостного тока всей сети ( $\lambda \ll 1$ ).

Частотная характеристика фильтров защиты должна обеспечивать надежную отстройку от тока небаланса трехтрансформаторного фильтра нулевой последовательности при максимальном рабочем токе и усилении малого вторичного тока с частотой 25 Гц до значений, позволяющих выполнить фиксацию этого тока современными средствами цифровой или аналоговой техники. Поскольку надежная отстройка от тока небаланса безусловно очень важна, то были проведены экспериментальные исследования по уточнению тока небаланса. В условиях резко отличающихся сопротивлений вторичных цепей и искусственного создания остаточной индукции, ток небаланса не превышал 14 мА. При непосредственных замерах на ряде генераторов ток небаланса при токе нагрузки, близком к номинальному, составлял от 4 до 10 мА.

Условия передачи малого тока низкой частоты во вторичные цепи фильтра тока нулевой последовательности получаются вполне благоприятными. Рассчитанное по начальной магнитной проницаемости для стали Э-380 эквивалентное сопротивление ветви намагничивания фильтра на частоте 25 Гц, составленного из трансформаторов тока с первичным номинальным током от 4000 до 8000 А, составляет соответственно от 100 до 400 Ом. При рабочем токе не равном нулю, даже начиная со сравнительно малых значений, погрешность передачи тока 25 Гц резко уменьшается. Это объясняется известным эффектом, заключающемся в том, что магнитная проницаемость ферромагнитного материала по отношению к слабому полю низкой частоты увеличивается при одновременном подмагничивании полем более высокой частоты.

На одной из электростанций (Западно-Сибирская ТЭЦ) в начальный период разработки были проведены испытания защиты на работающем генераторе путем замыкания нейтрали. При этом подтвердилось, что контрольный ток передается во вторичную цепь практически в соответствии с номинальным коэффициентом трансформации.

Селективная защита от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов, работающих в укрупненном блоке с непосредственным соединением генераторов.

Укрупненные блоки, включающие в себя несколько генераторов, работающих параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора, довольно широко распространены на многоагрегатных гидроэлектростанциях. В

качестве примера можно назвать Чебоксарскую ГЭС, Саратовскую ГЭС, Нижнекамскую ГЭС, Усть-Илимскую ГЭС. Нейтрали генераторов, как правило, заземлены через ДГР.

Одним из основных требований к защите генераторов в таких блоках является, как и в других схемах включения, отсутствие зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали. Желательным требованием является также селективность защиты по отношению к поврежденному генератору.

Первое требование принципиально выполняется при применении защиты, основанной на сравнении составляющих третьей гармоники в напряжении нулевой последовательности на выводах и в нейтрали генератора или других устройств защиты, предназначенной для блоков генератор-трансформатор без гальванической связи между генераторами.

Полноценное решение задачи, то есть выполнение требований отсутствия зоны нечувствительности и избирательности получено путем наложения контрольного тока с частотой 25 Гц. При этом выполняется также требование совместимости функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся замыканиях.

Источник контрольного тока также как и при выполнении защиты в электрических сетях включается последовательно в цепь ДГР, объединенных со стороны нейтрали (рис. 15).

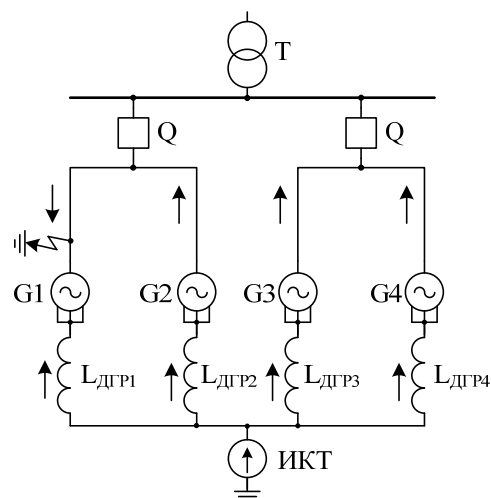


Рис. 15. Включение ИКТ в схеме укрупненного блока

Имеющийся опыт показал, что в современных генераторах с терморезистивной изоляцией обмотки статора возможны перемежающиеся дуговые замыкания.

На рис. 16 в качестве примера приведена одна из осциллограмм при дуговом перемежающемся замыкании в обмотке статора генератора вблизи выводов.

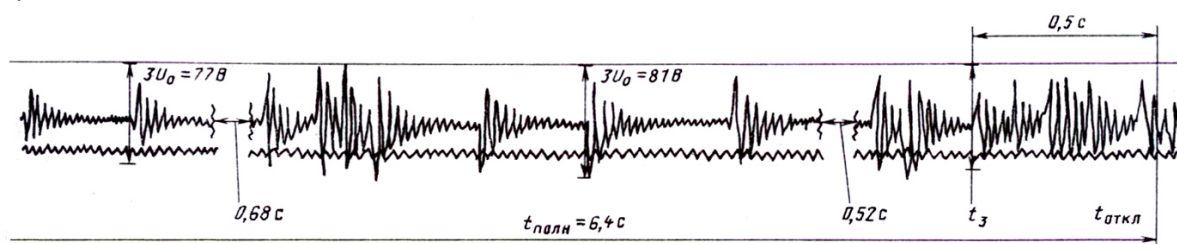


Рис. 16. Осциллограмма напряжения нулевой последовательности при перемежающемся замыкании в обмотке статора гидрогенератора Красноярской ГЭС

Для выполнения защиты используется фактор различия взаимного направления токов на выводах и со стороны нейтрали в поврежденном и неповрежденном генераторе при устойчивом замыкании.

Защита выполняется на дифференциальном принципе с использованием в качестве фильтров токов нулевой последовательности фазных трансформаторов тока, также как и в защите генераторов, работающих на сборные шины.

При этом ток в дифференциальной цепи в поврежденном генераторе всегда больше чем в неповрежденном (рис. 17).

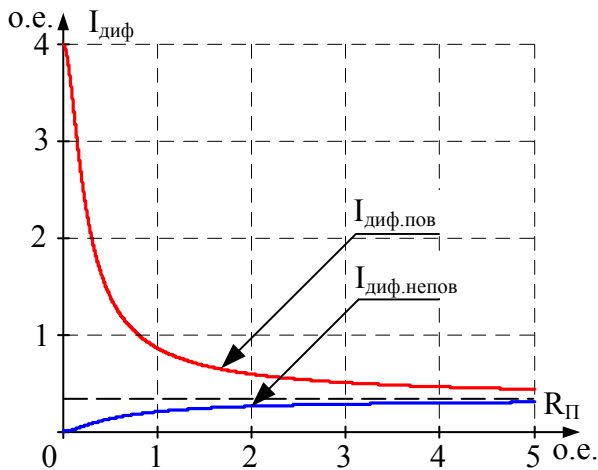


Рис. 17. Зависимости модулей токов в дифференциальной цепи защиты от переходного сопротивления при работе в блоке четырех генераторов

пределительной сети. Характер частотных спектров токов в дифференциальной цепи получается таким же, как у токов нулевой последовательности линий, а именно, при перемежающихся замыканиях амплитуды низкочастотных гармоник в поврежденном генераторе больше, чем в неповрежденном.

Таким образом при перемежающемся замыкании для выявления поврежденного генератора имеет место такой же признак, как и при устойчивом замыкании.

Особенность переходных процессов в схеме укрупненного блока по сравнению с переходными процессами в схеме распределительной сети заключается в том, что как токи разряда, так и токи дозаряда протекают по одинаковой цепочечной схеме, которой может быть замещена обмотка статора, как элемент с распределенными параметрами.

Переходный ток в месте замыкания в таких условиях имеет вид многочастотного затухающего процесса (рис. 19, компьютерная модель). Однако четко просматривается основная частота процесса. Это дает основание принимать, что переходный ток в месте замыкания переходит через ноль в моменты, соответствующие примерно целому числу полупериодов основной частоты переходного процесса.

При перемежающихся замыканиях пути протекания токов в схеме из двух генераторов показаны на рис. 18.

Токи на выводах генераторов на стадии горения дуги в поврежденном и неповрежденном генераторе имеют противоположные направления, а токи со стороны нейтрали, протекающие на стадии стекания избыточных зарядов, имеют одинаковое направление. Поэтому в дифференциальной цепи защиты можно воспроизвести ситуацию, которая имеет место в рас-

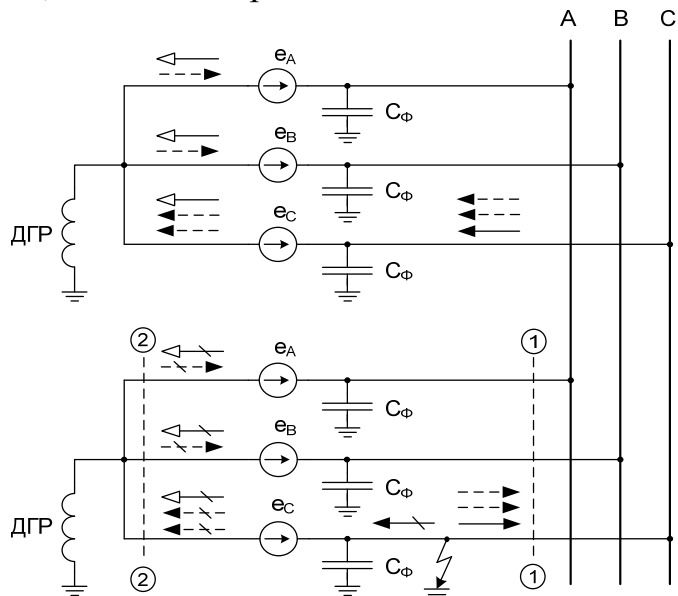


Рис. 18. Токи, обусловленные изменением зарядов фаз сети при дуговом замыкании в укрупненном блоке из двух генераторов:  $\rightarrow$   $\dashrightarrow$   $\dashrightarrow$  - токи разряда, дозаряда и стекания избыточных зарядов емкостей фаз неповрежденного генератора;  $\rightarrow$   $\dashrightarrow$   $\dashrightarrow$  - то же поврежденного генератора

Так как форма переходного тока, как показано выше, слабо влияет на амплитуды низкочастотных гармоник и в данном случае эти токи одинаковы во всех трех фазах, то выражение для него принимается в виде

$$i_B = \frac{3U_{\text{пр}}\omega_d^2 C_{\phi}}{\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}} \cdot e^{-\delta_d(t-t_{\text{пр}})} \sin \left[ \left( \sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2} \right) (t - t_{\text{пр}}) \right] + i_{B\infty}.$$

Процесс на стадии стекания избыточных зарядов после погасания дуги ничем не отличается от этого процесса в электрической сети с компенсацией емкостного тока.

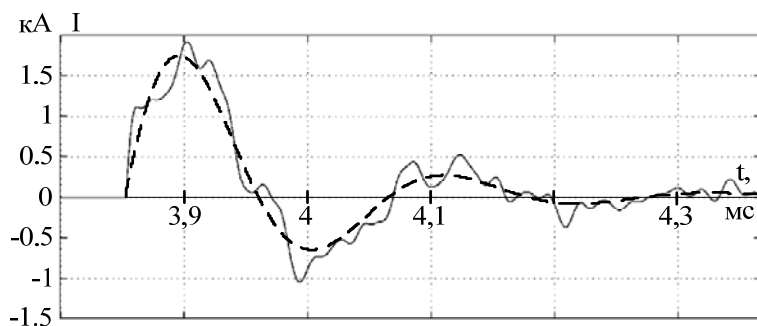


Рис. 19. Осциллограмма тока при замыкании на выводах генератора

Поскольку при одном из прохождений через ноль тока в месте замыкания одновременно обрывается как ток разрядной, так и дозарядной стадии, амплитуды гармоник от момента погасания дуги будут зависеть в большей степени, чем гармоники тока нулевой последова-

тельности линии электрической сети. Спектральная функция  $F$  по приближенному выражению для амплитуд гармоник в данном случае определяется значением  $F_d$ , умноженном на 1,5.

При выполнении избирательной защиты генераторов укрупненного блока имеют место наиболее сложные требования к частотным характеристикам фильтров. Это объясняется, во-первых, тем, что трансформаторы тока могут иметь большой коэффициент трансформации, во-вторых, фаза тока небаланса имеет случайное значение и вполне возможно, что при дифференциальной схеме токи небаланса фильтров тока нулевой последовательности по концам защищаемого участка будут суммироваться.

Для выделения низкочастотных гармоник фильтр выполняется в виде трех звеньев: фильтр низких частот, полосно-пропускающий фильтр, полосно-заграждающий фильтр. Основную функциональную нагрузку для выделения весьма малого сигнала на фоне большого тока небаланса несут полосно-заграждающий фильтр, для подавления основной составляющей помех с частотой близкой к промышленной, и полосно-пропускающий фильтр с резонансной частотой 25 Гц.

В связи с тем, что частота в энергосистеме в аварийных режимах может изменяться на несколько Герц, принимается с запасом для полосно-заграждающего фильтра полоса подавления в пределах 45 ÷ 55 Гц. Нижнее значение частоты принято исходя из того, что не допускается даже кратковременное снижение частоты ниже 45 Гц. А верхнее значение на том основании, что наибольшая уставка автоматики от повышения частоты принимается равной 53,5 Гц.

Полосно-пропускающий фильтр принимается с невысокой добротностью, так как именно он в основном определяет постоянную времени переходного процесса набора фильтров. Амплитудно-частотная и переходная характеристики принятого фильтра в целом представлены на рис. 20.

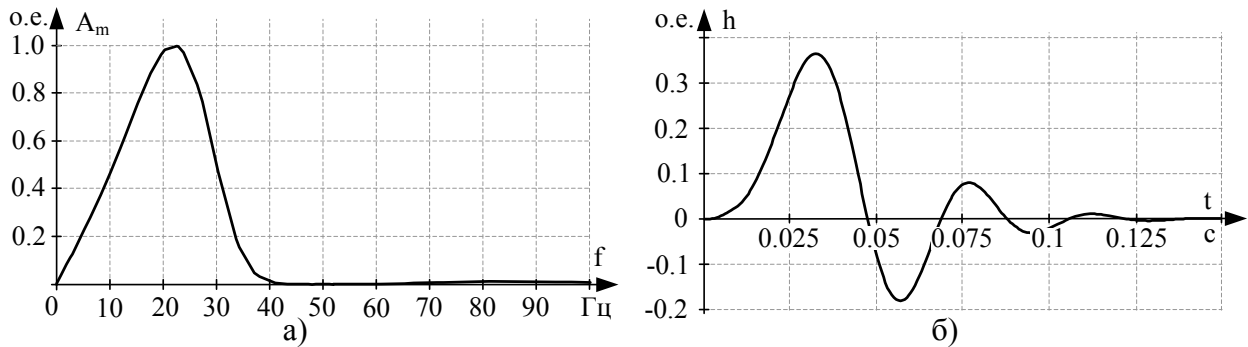


Рис. 20. Результирующая амплитудно-частотная (а) и переходная (б) характеристики фильтра

На рис. 21 и рис. 22 сопоставлены кривые мгновенных значений и частотные спектры на выходе фильтров при подаче на их вход сигналов, пропорциональных току на выводах генератора и в нейтрали.

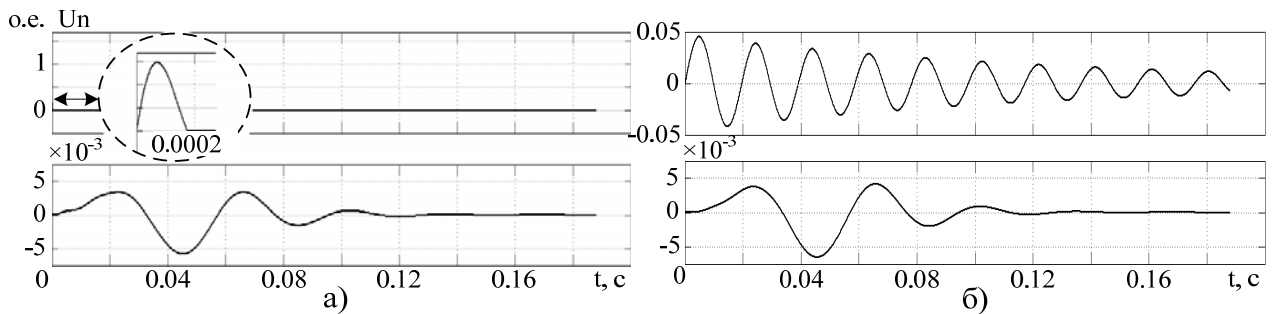


Рис. 21. Реакции фильтров при подаче на вход тока с выводов генератора (а) и с нейтрали (б)

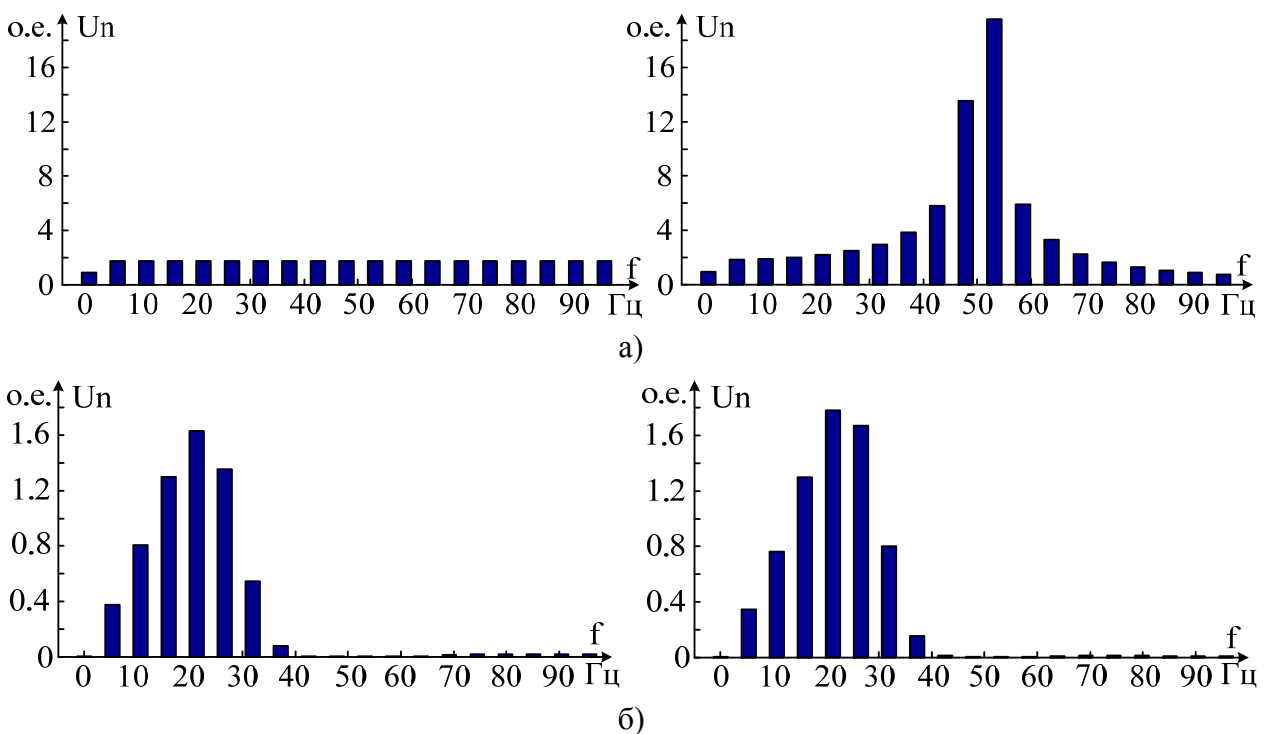


Рис. 22. Спектры сигналов, пропорциональных токам на выводах и в нейтрали соответственно: а) на входе фильтров; б) на выходе фильтров

Условия горения перемежающейся дуги следующие:  $n=1$ ;  $U_{пр} \approx U_{фм}$ ;  $\nu = -0,05$ ;  $\omega_d = 1,885 \cdot 10^4$  1/с;  $\delta = 5,498 \cdot 10^3$  1/с;  $T_1 = 0,188$  с.

Как видно, несмотря на существенное различие мгновенных значений сигналов на стадии горения дуги и стадии стекания, на выходе фильтров имеют место практически одинаковые кривые мгновенных значений и соответственно одинаковые частотные спектры. Это обстоятельство подтверждает одно из важных положений данной работы о том, что амплитуды низкочастотных гармоник отражают изменение зарядов емкостей фаз сети в каждом цикле: горение дуги – стекание избыточных зарядов.

В качестве меры уровня низкочастотных гармоник на выходе фильтров используется величина, пропорциональная их энергии за заданное время, которая формируется интегратором, управляемым от автономного генератора. При этом дополнительно можно использовать подтверждение замера за несколько циклов интегрирования.

Защита от замыканий на землю без зоны нечувствительности в обмотке статора гидрогенераторов, работающих в блоке с трансформаторами.

В ряде случаев у гидрогенераторов, работающих в блоке с трансформатором, нейтраль может быть заземлена через ДГР. С таким режимом заземления нейтрали работают гидрогенераторы Красноярской ГЭС. В данном случае генератор не имеет гальванической связи с другими генераторами и поэтому к защите от замыканий на землю предъявляется только требование отсутствия зоны нечувствительности. В случае, когда нейтраль гидрогенератора заземлена через ДГР, целесообразно выполнить защиту с наложением контрольного тока с частотой 25 Гц по рис. 23.

Для защиты при устойчивых замыканиях может быть использовано напряжение с частотой 25 Гц на ДГР. При изменении переходного сопротивления от  $\infty$  до 0 модуль этого напряжения увеличивается в 3 раза, а фаза изменяется на  $180^\circ$ . Зависимости модуля и фазы этих величин приведены на рис. 24.

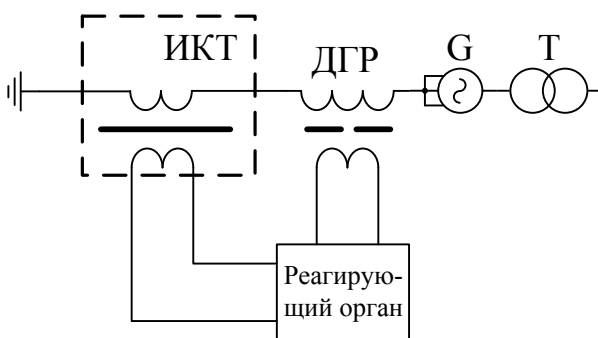


Рис. 23. Принципиальная схема включения элементов защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего в блоке с трансформатором

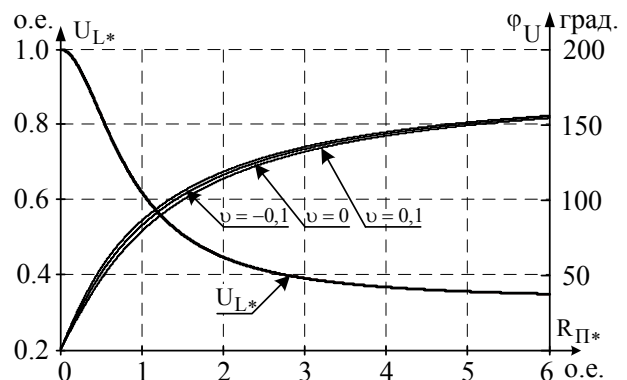


Рис. 24. Абсолютное значение напряжения с частотой 25 Гц на ДГР и его фазы от переходного сопротивления в месте замыкания (относено к напряжению ИКТ)

В данном случае вопрос о совмещении условий функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся замыканиях не является столь принци-

пиальным как в схеме укрупненного блока. Это объясняется тем, что при замыкании вблизи нейтрали при низких напряжениях перемежающиеся замыкания маловероятны. При замыканиях, удаленных от нейтрали, в том числе и при перемежающихся, по принципу действия работает защита, реагирующая на напряжение нулевой последовательности промышленной частоты.

**В главе 4** выполнены исследования и разработка методов и средств контроля и автоматической настройки компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях  $6 \div 35$  кВ с использованием контрольного тока с частотой 25 Гц.

Наличие в сети с компенсацией емкостного тока постоянно работающего источника с частотой 25 Гц позволяет достаточно полноценно решить задачу непрерывного контроля и автоматической настройки ДГР.

Опыт эксплуатации сетей с компенсацией емкостного тока показывает, что при соответствующей настройке ДГР, эффективность компенсации емкостных токов как правило высока. При этом под эффективностью компенсации понимается способность дугогасящих аппаратов ограничивать токи через место повреждения, перенапряжения и скорость восстановления напряжения после погасания заземляющей дуги. Степень положительного влияния перечисленных факторов при применении компенсации емкостного тока определяется главным образом двумя относительными параметрами, расстройкой компенсации и коэффициентом демпфирования, и в меньшей степени зависит от абсолютного значения тока замыкания.

Непосредственно к сетям с компенсацией емкостного тока относится предложение о комбинированном заземлении нейтрали, которое заключается в том, что параллельно ДГР подключается резистор, проводимость которого составляет  $10 \div 20$  % от суммарной емкостной проводимости сети относительно земли.

В связи с этим при разработке методов и средств непрерывного измерения расстройки компенсации необходимо, в общем случае, обеспечить их работоспособность и в условиях больших значений коэффициента демпфирования. Также может быть полезным одновременно с измерением расстройки компенсации иметь возможность непрерывно измерять фактическое результирующее значение коэффициента демпфирования.

При наличии в контуре нулевой последовательности ИКТ, включенного последовательно в цепь ДГР, о соотношении емкостного сопротивления относительно земли  $z_C$  и эквивалентного сопротивления ДГР  $z_L$  можно судить по значению напряжения на одном из них

$$\dot{U}_L = \frac{U}{1 + \frac{z_C}{z_L}}, \quad \text{или} \quad \dot{U}_C = \frac{U}{1 + \frac{z_L}{z_C}}.$$

Практически используется вариант измерения напряжения  $\dot{U}_L$ . При неучете в первом приближении активных проводимостей в контуре нулевой последовательности модуль этого напряжения равен



$$U_L = \frac{v^2 U}{1 - v^2 - v}, \quad (16)$$

где  $v$  - отношение частоты контрольного тока к промышленной.

Величина  $\dot{U}_L$  может использоваться для измерения расстройки компенсации в том случае, если в требуемом диапазоне измерения расстройки не нарушается монотонность зависимостей  $\dot{U}_L(v)$ . Из (16) следует, что предельное значение расстройки компенсации  $v = v_{пр}$  из условия сохранения монотонности определяется соотношением

$$1 - v^2 - v_{пр} = 0.$$

При частоте 25 Гц ( $v = 0,5$ ) диапазон измерения расстроек компенсации ограничен в сторону недокомпенсации значением  $v = 0,75$ , а в сторону перекомпенсации ограничений нет. Такой диапазон с запасом охватывает возможные значения расстройки компенсации.

Рассматриваемый метод измерения расстройки компенсации может использоваться для решения задачи автоматической настройки ДГР при наличии в электрической сети плавнорегулируемых ДГР и для непрерывной индикации расстройки компенсации в тех случаях, когда используются ДГР со ступенчатым регулированием. И в том и в другом случаях необходимо сформировать сигнал, который должен удовлетворять следующим условиям:  $U_v = 0$  при  $v = 0$ ;  $U_v > 0$  при  $v > 0$ ;  $U_v < 0$  при  $v < 0$ .

Сигнал  $U_v$  может быть сформирован как разность абсолютного значения  $U_L$  и опорного напряжения  $U_0$ , равного  $U_L$  при  $v = 0$ . При этом сигнал  $U_v$ , отнесенный к  $U$

$$U_{v*} = \frac{v^2}{1 - v^2 - v} - \frac{v^2}{1 - v^2}.$$

Зависимость  $U_{v*}(v)$  нелинейна, но это практически не имеет значения при решении задачи автоматической настройки, выполняемой в виде системы с обратной связью.

Когда при отсутствии плавнорегулируемых ДГР должна осуществляться непрерывная индикация фактического значения расстройки, желательно получить сигнал, зависящий от нее по линейному закону. Способ формирования такого сигнала вытекает непосредственно из выражения (16) и соответствует выделению в явном виде величины расстройки  $-v$

$$v = (1 - v^2) \frac{U_L - \frac{v^2}{1 - v^2} U}{U_L}. \quad (17)$$

Измерение коэффициента демпфирования также возможно на основе использования напряжения на дугогасящем реакторе, которое с учетом эквивалентной активной проводимости контура нулевой последовательности равно

$$\dot{U}_{L*} = \frac{\left[ (d^2 + 1 - v^2 - v) + j \frac{d}{v} (v - 1) \right] (d^2 + v^2)}{(d^2 + 1 - v^2 - v)^2 + \left[ \frac{d}{v} (v - 1) \right]^2}.$$

Так как практически, даже при комбинированном заземлении нейтрали  $d$  не более 0,2, то можно пренебречь в первом приближении членами, содержащими  $d^2$ . В этом случае вещественная составляющая  $U_{L*}$  совпадает с (16), а мнимая составляющая пропорциональна коэффициенту демпфирования

$$U_{L*}^M = \frac{d(v-1)v}{(1-v^2-v)^2}.$$

Если при автоматической настройке компенсации поддерживается  $v \approx 0$ , то  $U_{L*}^M = \frac{dv}{(v^2-1)^2}$ .

Зависимость методических погрешностей измерения  $v$  от  $d$  и  $d$  от  $v$  приведены соответственно на рис. 25 и рис. 26.

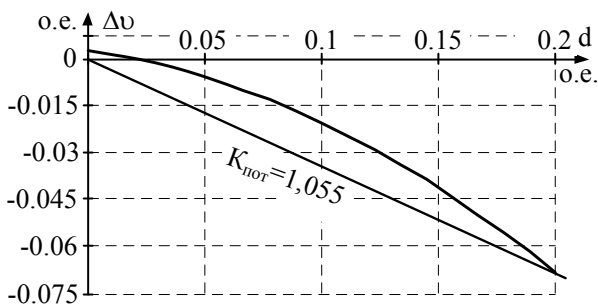


Рис. 25. Зависимость абсолютной погрешности измерения расстройки компенсации через вещественную часть напряжения на ДГР от  $d$  (относительно идеальных условий при  $d = 0$ )

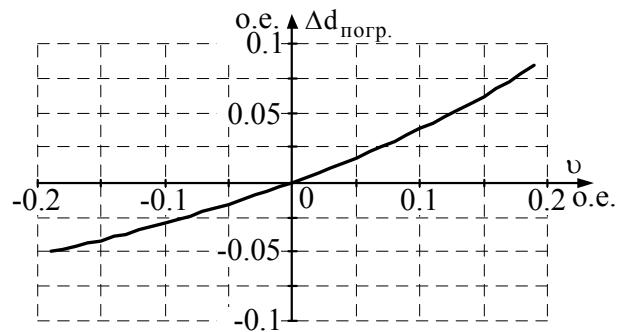


Рис. 26. Относительная погрешность измерения коэффициента демпфирования через мнимую составляющую напряжения на ДГР

При рассмотрении вопроса о допустимости измерений  $v$  с полученной расчетной методической погрешностью учтено, что влияние расстройки компенсации на все факторы, определяющие эффективность компенсации, снижается при увеличении  $d$ . Такими факторами являются:

- время восстановления напряжения на поврежденной фазе до значения, близкого к амплитуде фазного напряжения после погасания дуги;
- начальная скорость восстановления напряжения;
- перенапряжения при дуговых перемежающихся замыканиях;
- остаточный ток промышленной частоты в месте устойчивого замыкания.

В таблице 2 приведено относительное изменение факторов, влияющих на гашение дуги и перенапряжения при расстройке компенсации  $\pm 5\%$  и двух значениях  $d = 0,05$  и  $d = 0,1$ .

Таблица 2

Фактор	$d = 0,05$	$d = 0,1$	Ослабление влияния $\nu$
Время восстановления напряжения до $U = 0,9U_{\text{фм}}$	уменьшение в 2 раза	уменьшение в 1,3 раза	0,65
Начальная скорость восстановления напряжения	увеличение в 1,41 раза	увеличение в 1,12 раза	0,8
Остаточный ток замыкания промышленной частоты	увеличение в 1,41 раза	увеличение в 1,12 раза	0,8
Расчетное максимальное перенапряжение	увеличение в 1,28 раза	увеличение в 1,02 раза	0,8

Из полученных данных следует, что наибольшее ослабление влияния расстройки при увеличении  $d$  имеет место по отношению к времени восстановления напряжения. Меньшее и примерно равное ослабление имеет место по отношению к начальной скорости восстановления напряжения, остаточному току промышленной частоты и перенапряжениям.

Для оценки значения рассматриваемых факторов следует заметить, что максимальные перенапряжения возникают при определенном маловероятном сочетании мгновенных значений перенапряжений фаз в момент пробоя, а влияние остаточного тока промышленной частоты ослабляется наличием в токе высших гармоник.

В то же время относительно начальной скорости восстановления напряжения, которая равна

$$\left( \frac{dU_{\text{пф}}}{dt} \right)_{\text{нач}} = U_{\text{фм}} \frac{1}{2} \omega \sqrt{d^2 + \nu^2},$$

в одной из фундаментальных работ [Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. 1959 г.] говорится, что «в особенности важна начальная скорость возрастания огибающей (напряжения), которая является мерой стремления к повторному зажиганию дуги» и далее «абсолютная величина остаточного тока важна, но, тем не менее, имеет второстепенное значение».

В связи с этим в качестве количественного критерия потери качества компенсации относительно идеальных условий предложено использовать относительное увеличение начальной скорости восстановления напряжения

$$K_{\text{ПОТ}} = \frac{\sqrt{d^2 + \nu^2}}{d}.$$

Например для нормируемой по ПТЭ для кабельных сетей допустимой расстройке компенсации  $\nu = 0,05$  и типичном значении  $d = 0,05$   $K_{\text{ПОТ}} = 1,41$ . Если не принимать каких-либо мер по снижению методической погрешности измерения  $\nu$ , то фактически  $K_{\text{ПОТ}}$  в диапазоне  $d = 0 \div 0,2$  составляет 1,055 (см. рис. 25).

Для измерения расстройки компенсации должна реализовываться операция в соответствии с соотношением (17) при  $\nu = 0,5$ .

$$U_\nu = \frac{3}{4} \cdot \frac{U_L - \frac{1}{3}U}{U_L}.$$

Наиболее существенной является необходимость выполнения операции сравнения двух сигналов, пропорциональных, соответственно величинам  $U_L$  и  $\frac{1}{3}U$ .

Сравниваемые сигналы, особенно  $U_L$ , сильно искажены гармониками и кроме того этот сигнал необходимо выделить на уровне помех, главной из которых может быть напряжение смещения нейтрали, обусловленное естественной несимметрией проводимостей фаз сети.

Выполнение операции сравнения после необходимой подготовки сигналов  $U_L$  и  $U$ , включающей в себя частотную фильтрацию, усиление, выделение абсолютного значения, требует применения элементов, обладающих высокой точностью и стабильностью, так как различие в коэффициентах передачи сигналов полностью проявится в абсолютной погрешности измерения  $\nu$ . В связи с этим операция сравнения напряжений  $U_L$  и  $\frac{1}{3}U$  технически реализуется до частотной фильтрации и усиления с использованием только пассивных элементов. Схема формирования разностного сигнала  $\Delta U_L = U_L - \frac{1}{3}U$  однократно калибруется по условиям точной настройки компенсации ( $\nu = 0$ ).

При применении пассивной схемы сравнения сигналов в сочетании с калибровкой относительное изменение коэффициента усиления фильтра-усилителя разностного сигнала проявляется в равной этому изменению теперь уже относительной погрешности измерения расстройки компенсации по отношению к ее текущему значению.

**В главе 5** рассмотрено использование закономерностей, вскрытых при рассмотрении процессов в сети с компенсацией емкостного тока, в электроустановках с другими режимами заземления нейтрали и их приложение к разработке защиты от замыканий на землю. При этом необходимо выделить различия и общие свойства процессов при однофазных замыканиях в сети с различными режимами заземления нейтрали.

Естественно, что важным является наличие или отсутствие признаков поврежденного элемента при устойчивом замыкании по токам и напряжению нулевой последовательности промышленной частоты. Принципиально такой признак отсутствует только в электроустановках с компенсацией емкостного тока.

При перемежающихся замыканиях важная общая особенность процессов при различных режимах заземления нейтрали обусловлена закономерностями изменения зарядов емкостей фаз сети. Если режим заземления нейтрали таков,

что имеет место достаточно полное стекание избыточных зарядов после погасания дуги, то в отношении интеграла тока нулевой последовательности за время между двумя пробоями изоляции справедливы закономерности, подобные закономерностям в сети с компенсацией емкостного тока. Это обстоятельство в полной мере относится к сетям с резистивным заземлением нейтрали.

Важно отметить, что условие полного стекания избыточных зарядов, как известно, является также необходимым для снижения дуговых перенапряжений.

При изолированной нейтрали возможно накопление зарядов от пробоя к пробоям, и компенсации изменения зарядов на неповрежденной линии не происходит. Закономерности, имеющие место при изолированной нейтрали, рассмотрены как частный случай резистивного заземления.

В сети с резистивным заземлением нейтрали также как и в сети с компенсацией емкостного тока нужно решить вопрос о способе обработки тока нулевой последовательности, при котором в достаточной степени отображается благоприятное изменение интеграла тока нулевой последовательности, а именно определить область частот для выбора соответствующих фильтров измерительных органов защиты.

Поскольку при устойчивых замыканиях в данном случае защита работает за счет токов нулевой последовательности промышленной частоты, то эта частота должна попадать в полосу пропускания частотной характеристики фильтра.

Показано, что удовлетворительные результаты получаются при выполнении фильтра с частотой среза несколько большей 50 Гц. В частности, в одном из исполнений примененной на практике защиты фильтр низкой частоты выполнен из двух звеньев первого порядка с частотой среза у каждого 80 Гц. При таком выполнении фильтра сигнал на его выходе при всем многообразии перемежающихся замыканий имеет форму, близкую к синусоиде с частотой 50 Гц, поскольку реальные сигналы при перемежающихся замыканиях в этой полосе частот содержат только высшие гармоники, кратные 50 Гц.

К рассмотрению приняты такие виды перемежающихся замыканий, которые порождают в сети электрические величины, наибольшим образом отличающиеся от электрических величин при устойчивом замыкании, а именно такие случаи, когда переходный ток носит колебательный характер со слабым затуханием и погасание дуги происходит в один из моментов перехода через ноль емкостного тока дозаряда емкостей неповрежденных фаз.

Амплитуды гармоник токов нулевой последовательности целесообразно определять через амплитуду первой гармоники напряжения нулевой последовательности, так как последнее при принятых условиях достаточно точно может быть описано простыми функциями.

Частота переходного тока и в этом случае намного больше частоты повторения пробоев, поэтому напряжение на поврежденных фазах, а следовательно и напряжение на нейтрали при горении дуги нарастает за время значительно меньшее, чем период следования пробоев. С учетом того, что после погасания

дуги напряжение на нейтрали снижается по экспоненциальному закону, в пределах одного полупериода его можно представить в виде:

$$U_N = u_{N\Gamma} \cdot e^{-t/\tau_c}, \quad (18)$$

где  $\tau_c = 1/I_{a*}\omega_{\Pi}$  – постоянная времени цепи стекания избыточных зарядов;

$I_{a*}$  – отношение активной составляющей тока к емкостному току в месте устойчивого замыкания.

Амплитуда первой гармоники напряжения по (18)

$$U_{N1} = \frac{2 \cdot (1 + e^{-I_{a*}\pi})}{\pi \sqrt{1 + I_{a*}^2}} u_{N\Gamma}.$$

Напряжение в момент погасания дуги  $u_{N\Gamma}$  для принятых  $I_{a*}$  определялось при таком максимально возможном пробивном напряжении  $U_{\text{пр}}$ , когда еще поддерживается периодический процесс с зажиганием дуги на каждом полупериоде напряжения промышленной частоты. При изолированной нейтрали ( $I_{a*} = 0$ ) напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$  было ограничено значением, при котором перенапряжения на одной из неповрежденных фаз не превышает максимально возможного значения (по статистическим данным  $\approx 3U_{\text{фм}}$ ).

Также как и в сети с компенсацией емкостного тока наибольшее значение амплитуды гармоник имеют при  $n = 1$ , а наименьшее при  $n = 2$ , и их отличие тем больше, чем меньше коэффициент затухания. Условия при  $n = 1$  и  $n = 2$  должны быть приняты как условия соответственно для отстройки при внешнем замыкании и для проверки чувствительности при внутреннем замыкании. Расчетные значения  $u_{N\Gamma}$ , отнесенные к амплитуде фазного напряжения сети, приведены в таблице 3. Принято такое значение  $\delta$ , при котором амплитуда переходного емкостного тока затухает за половину периода на 20 %.

Таблица 3

$I_a$	0	0,5	1	1,5
$u_{N\Gamma}, n = 1$	1,58	1,51	1,39	1,01
$u_{N\Gamma}, n = 2$	0,52	0,66	0,7	0,72

При изолированной нейтрали амплитуда первой гармоники напряжения нулевой последовательности при  $n = 1$  составляет  $1,95U_{\text{фм}}$ . Таким образом обоснованно, что в сети с изолированной нейтралью можно рекомендовать отстраивать защиту от собственного емкостного тока линии с коэффициентом, равным 2.

Условия выбора тока срабатывания радикально меняются при резистивном заземлении нейтрали. При этом амплитуда основной гармоники тока нулевой последовательности снижается не только за счет снижения  $u_{N\Gamma}$ , но и за счет эффекта компенсации изменения зарядов емкостей фаз после погасания дуги. В худшем для отстройки случае ( $n = 1$ ) она снижается до амплитуды фазного напряжения уже при  $I_{a*} = 0,6$  (рис. 27).

При  $I_{a^*} = 1$ , когда выполняется условие практически полного стекания избыточных зарядов, амплитуда первой гармоники напряжения нулевой последовательности при тех же условиях получается равной  $0,665U_{фм}$ . Поэтому расчетным условием для определения тока срабатывания является устойчивое замыкание.

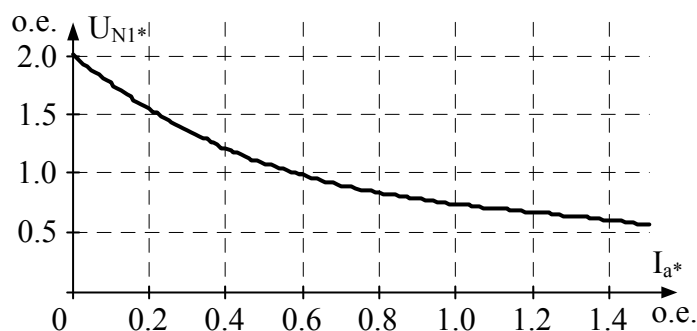


Рис. 27. Зависимость амплитуды первой гармоники напряжения нулевой последовательности от активной составляющей тока при перемежающемся замыкании ( $n = 1$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе **решена научно-техническая проблема** усовершенствования защиты от замыканий на землю генераторов и электрических сетей 6 ÷ 35 кВ. На основе результатов исследований **предложен новый алгоритм** обработки токов нулевой последовательности, при котором обеспечивается инвариантность функционирования защиты от замыканий на землю к многообразию электрических процессов при дуговых перемежающихся замыканиях и к многообразию параметров защищаемых объектов и **впервые разработан** и внедрен в практику релейной защиты новый технический элемент – источник контрольного тока с частотой ниже промышленной. Диссертация основывается на результатах работ, выполненных под руководством и непосредственным участием автора по заказам энергетических предприятий эксплуатирующих, проектирующих и выпускающих аппаратуру релейной защиты.

Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Практически реализован метод выполнения защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока на принципе наложения вспомогательного (контрольного) тока с возможностью измерения этого тока в ветвях первичной схемы с помощью типовых трансформаторов и фильтров токов нулевой последовательности и обеспечением принципиальной совместимости функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях.

2. Обосновано, что совместимость функционирования защиты при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях в электроустановках с компенсацией емкостного тока принципиально возможна при использовании контрольного тока с частотой ниже промышленной. Это объясняется тем, что операция фильтрации в области низких частот приближенно отображает изменение зарядов емкостей фаз за время между двумя пробоями изоляции, которое в неповрежденных элементах близко к нулю, а в поврежденных равно суммарному изменению зарядов емкостей фаз сети.

3. Создан новый для техники релейной защиты технический элемент – источник контрольного тока с частотой 25 Гц, удовлетворяющий как специфическим функциональным требованиям, так и требованиям высокой надежности и простоты эксплуатации.

4. Решение задач по п.п. 1, 2 и 3 позволило разработать и довести до практического применения следующие виды защит от замыканий на землю:

4.1. Защита электрических сетей с компенсацией емкостного тока;

4.2. Защита обмотки статора генераторов, работающих на сборные шины в сети с компенсацией емкостного тока;

4.3. Избирательная защита обмотки статора генераторов с нейтралью заземленной через ДГР и включенных параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора;

4.4. Защита обмотки статора гидрогенераторов с нейтралью заземленной через ДГР и работающих в блоке с трансформатором.

Защиты по п.п. 4.2, 4.3 и 4.4 не имеют зоны нечувствительности по принципу действия.

5. Выполнен анализ и получены необходимые соотношения для расчета электромагнитных и конструктивных параметров параметрического делителя частоты на два, на основе которого разработан источник контрольного тока. При проведении анализа показано, что:

- Магнитные и электрические величины, соответствующие условию возбуждения колебаний половинной частоты могут быть с достаточной точностью определены по первому приближению уравнения границы нарушения устойчивости нулевого решения уравнения с периодически изменяющимся коэффициентом.

- Максимальное значение амплитуды индукции колебаний половинной частоты может определяться без учета составляющих основной частоты и постоянной составляющей индукции.

- Условие равенства среднего квадрата резонансной частоты параметрически возбуждаемого колебательного контура квадрату половинной частоты может использоваться как единое условие для приближенного определения индукции основной частоты на границе возбуждения колебаний и индукции половинной частоты. На основе этого условия представляется возможным выбрать все основные параметры делителя частоты по заданным условиям его работы в составе источника контрольного тока.

6. Проведен анализ работы делителя частоты в качестве источника контрольного тока, когда по его выходным обмоткам протекает ток промышленной частоты. Результаты этого анализа позволили предложить простое и эффективное изменение схемы делителя частоты, благодаря которому, во-первых, обеспечивается практическая независимость работы делителя частоты от протекающего через него тока ДГР и, во-вторых, исключается влияние источника контрольного тока на режим заземления нейтрали.

7. Показано, что наличие в сети постоянно работающего источника с частотой 25 Гц позволяет путем формирования отношения напряжения с частотой 25 Гц на дугогасящем реакторе к напряжению источника измерить степень



расстройки компенсации, а при необходимости и коэффициент демпфирования. На основе этого разработаны устройства для непрерывного контроля и автоматической настройки ДГР.

8. Свойство интеграла тока нулевой последовательности, также как в сети с компенсацией емкостного тока, благоприятно для выполнения защиты при других режимах заземления нейтрали, обеспечивающих достаточно полное стекание избыточных зарядов за время между двумя пробоями изоляции, например в сети с высокоомным резистивным заземлением нейтрали. Показано, что в этом случае в защите должна использоваться область низких частот до  $70 \div 80$  Гц.

#### **Список трудов, опубликованных по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. **Вайнштейн Р.А.** Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири / Вайнштейн Р.А., Лапин В.И., Наумов А.М., Доронин А.В. // Электрические станции. – 2009. – №12. С. 26-30.
2. **Вайнштейн Р.А.** Условие функционирования защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях / Вайнштейн Р.А., Пашковский С.Н., Понамарев Е.А., Шестакова В.В. // Электричество. – 2009. – № 12. С. 26-32.
3. **Вайнштейн Р.А.** Повышение надежности защиты генераторов от замыканий на землю, основанной на наложении вспомогательного тока с частотой 25 Гц / Вайнштейн Р.А., Тентиев Р.Б., Юдин С.М. // Известия Томского политехнического университета, 2008. – Т. 312. – № 4. С. 96–100.
4. **Вайнштейн Р.А.** Выявление качественных признаков поврежденного элемента в электроустановках с компенсацией емкостного тока и с комбинированным заземлением нейтрали при дуговых замыканиях / Вайнштейн Р.А., Пашковский С.Н., Юдин С.М. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008.– №1. С. 102-107.
5. **Вайнштейн Р.А.** О возможности выполнения защиты от замыканий на землю на основе формирования приращения тока на выходе фильтра нулевой последовательности / Вайнштейн Р.А., Доронин А.В., Понамарев Е.А., Шестакова В.В. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – №1 С. 98-102.
6. **Вайнштейн Р.А.** Качественные признаки для выявления поврежденного элемента в электроустановках с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях / Вайнштейн Р.А., Пашковский С.Н., Понамарев Е.А., Юдин С.М. // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – №7-8/1 С. 136-143.
7. **Вайнштейн Р.А.** Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали / Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М., Гурин Т.С. // Известия ВУЗов, Электромеханика. – 2006. – №3 С. 115-118.

8. **Вайнштейн Р.А.** Вероятностная модель электрических процессов при дуговых замыканиях в электрических сетях с компенсацией емкостных токов / Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М. // Известия ВУЗов ТПУ, 2005, №7, Том 308 С. 189–194.
9. **Вайнштейн Р.А.** Непрерывный контроль степени расстройки компенсации и автоматическая настройка дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–10 кВ на основе наложения токов с частотой 25 Гц / Вайнштейн Р.А., Березницкий С.Л., Шестакова В.В., Юдин С.М. // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2004. – №4. С. 54-59.
10. **Вайнштейн Р.А.** Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Коберник Е.Д., Юдин С.М. // Электрические станции. – 1998. – №7. С. 26-30.
11. **Вайнштейн Р.А.** Опыт эксплуатации и модернизации защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС / Вайнштейн Р.А., Бобрин В.Д., Волков Г.А. // Электрические станции. – 1992. – №9. С. 12-15.
12. **Вайнштейн Р.А.** Условия селективной работы защит с наложением контрольного тока при перемежающихся дуговых замыканиях / Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Албул В.Н. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1988. – №7. С. 22-26.
13. **Вайнштейн Р.А.** Вероятностная оценка селективности защиты от замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью / Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Фальк Ю.П. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1987. – №3. С. 49-52.
14. **Вайнштейн Р.А.** О влиянии междофазных емкостей на разрядную стадию тока замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостного тока / Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Колодяжный В.В. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1983. – №12. С. 54-57.
15. **Вайнштейн Р.А.** Защита от замыканий на землю обмотки статора генераторов, работающих на сборные шины / Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Коберник Е.Д. // Электрические станции. – 1981. – №10. С. 54-56.
16. **Вайнштейн Р.А.** О гармоническом составе токов нулевой последовательности в сетях с компенсацией емкостного тока при замыкании на землю через перемежающуюся дугу / Вайнштейн Р.А., Головки С.И. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1978. – №12. С. 14-19.
17. **Вайнштейн Р.А.** Физическое моделирование электрических процессов, вызываемых перемежающимися дуговыми замыканиями / Вайнштейн Р.А., Головки С.И. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1978. – №10. С. 116-120.
18. **Вайнштейн Р.А.** О возможности использования первого приближения границы неустойчивости решения уравнения Хилла для практического расчета параметрических систем / Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В. // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1975. – №8. С. 871-875.
19. **Вайнштейн Р.А.** Расчет ферромагнитных делителей частоты по средней собственной частоте / Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В., Коломиец Н.В. // Электричество. – 1974. – №9. С. 66-68.

20. **Вайнштейн Р.А.** Устройство для контроля состояния системы непосредственного водяного охлаждения обмотки статора синхронных генераторов / Вайнштейн Р.А., Гетманов В.Т., Чикунов А.Г. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1974. – №7. С. 9-12.
21. **Вайнштейн Р.А.** Стопроцентная селективная защита от замыканий на землю обмотки статора синхронных генераторов укрупненного блока / Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В., Гетманов В.Т. // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1974. – №2. С. 12-16.
22. **Вайнштейн Р.А.** О переходных процессах в параметрических делителях частоты / Вайнштейн Р.А., Пушков А.П. // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1972. – №5. С. 558-560.
23. **Вайнштейн Р.А.** Анализ и расчет параметрического делителя частоты с изменяющейся индуктивностью / Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В., Мусин А.Х. // Электричество. – 1972. – №3. С. 49-52.
24. **Вайнштейн Р.А.** Стопроцентная защита от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС / Вайнштейн Р.А., Гетманов В.Т., Шмойлов А.В., Пушков А.П. // Электрические станции. – 1972. – №2. С. 41-44.

#### **Другие работы автора:**

25. **Вайнштейн Р.А.** Использование понятия средней резонансной частоты для определения границы неустойчивого режима нелинейного параметрического контура / Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В. // Третья Всесоюзная Межвузовская конференция по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем. – Ташкент, 1967. С. 50–51.
26. **Вайнштейн Р.А.** Анализ и расчет низкочастотных параметрических систем с изменяющейся индуктивностью / Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В. // Третья Всесоюзная Межвузовская конференция по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем. – Ташкент, 1967. С. 78–79.
27. **Вайнштейн Р.А.** Использование электромагнитного делителя частоты в качестве источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю компенсированных сетей // Вайнштейн Р.А., Воронова Л.И., Шмойлов А.В. // Известия ТПИ. – 1969. – Т. 179. С. 16–21.
28. **Вайнштейн Р.А.** О возможности выполнения защиты от замыканий на землю генераторов, работающих в компенсированной сети на наложенном токе 25 Гц с использованием фазных трансформаторов тока / Вайнштейн Р.А., Кутявин И.Д., Воронова Л.И. // Известия ТПИ. – 1969. – Т. 179. С. 71–75.
29. **Вайнштейн Р.А.** Параметрический делитель частоты специальной конструкции для защиты от замыканий на землю / Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В. // Магнитные элементы непрерывного действия. М: Наука. – 1972. С. 114–120.
30. **Вайнштейн Р.А.** Качественный анализ параметрических колебаний в областях неустойчивости нечетного порядка / Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В. // Известия ТПИ. – 1976. – Т. 295. С. 123-128.

31. **Vainshtein R.A.** Protection system from drawing near ground in resonantly rounded neutral electric networks / Vainshtein R.A., Judin S.M. // *Материалы симпозиума KORUS*. – Томск, 1998.
32. **Вайнштейн Р.А.** О требованиях к точности настройки компенсации емкостного тока однофазного замыкания / Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В. // *Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ. Материалы Всероссийской конференции*. – Новосибирск. – 2004. С. 173-178.
33. **Вайнштейн Р.А.** Выполнение входных цепей реле защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М. // *Новости электротехники*. – 2007. – №3. С. 54–56.
34. **Вайнштейн Р.А.** Защита от замыканий на землю в сети с высокоомным заземлением нейтрали / Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М. // *Новости электротехники*. – 2008. – №6. С. 36-39.
35. **Вайнштейн Р.А.** Защита от замыканий на землю обмотки статора генераторов, работающих на сборные шины / Вайнштейн Р.А., Понамарев Е.А., Доронин А.В., Наумов А.М. // *Энергетик*. – 2009. – №1 С. 39-40.

#### **Патенты и авторские свидетельства**

36. Патент 2402130 Россия. МПК H02H 3/16. Устройство для защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией емкостных токов / **Вайнштейн Р.А.**, Шестакова В.В., Юдин С.М., Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. // Заявлено 27.07.2009. Оpub. 20.10.2010. Бюл.№29.
37. Патент 2334334 Россия. МПК H02H 9/08. Устройство для измерения расстройки компенсации емкостного тока замыкания на землю и коэффициента демпфирования / **Вайнштейн Р.А.**, Шестакова В.В., Юдин С.М. // Заявлено 20.07.2007. Оpub. 20.09.2008. Бюл.№26.
38. Патент 2286637 Россия. МПК H02H 3/16. Устройство для селективной защиты от замыканий на землю в обмотке статоров генераторов, работающих в укрупненном блоке / **Вайнштейн Р.А.**, Шестакова В.В., Юдин С.М., Наумов А.М., Райспих И.К. // Заявлено 29.07.2005. Оpub. 27.10.2006. Бюл.№30.
39. Патент 2286636 Россия. МПК H02H 3/16. Устройство для селективной защиты от замыканий на землю в обмотке статоров генераторов, работающих в укрупненном блоке / **Вайнштейн Р.А.**, Шестакова В.В., Юдин С.М., Наумов А.М., Райспих И.К. // Заявлено 29.07.2005. Оpub. 27.10.2006. Бюл.№30.
40. Патент 2268524 Россия. МПК H02H 3/16. Устройство для защиты от замыканий в сетях с компенсацией емкостного тока / **Вайнштейн Р.А.**, Шестакова В.В., Юдин С.М. // Заявлено 17.08.2004. Оpub. 20.01.2006. Бюл. №2.
41. Патент 2266600 Россия. МПК H02H 9/08. Устройство для автоматической настройки компенсации дугогасящего реактора с регулируемым воздушным зазором / **Вайнштейн Р.А.**, Шестакова В.В., Юдин С.М. // Заявлено 06.07.2004. Оpub. 20.12.2005. Бюл. №35.
42. Патент 2227954 Россия. МПК 7 H02H 9/08. Устройство для измерения расстройки компенсации емкостного тока замыкания на землю / **Вайн-**

- штейн Р.А.**, Березницкий С.Л., Шестакова В.В., Юдин С.М. // Заявлено 12.11.2002. Оpubл.27.04.2004. Бюл. №12.
43. А.с. 1504718 СССР. МПК H02H 9/08. Способ определения настройки дугогасящего аппарата, подключенного к заземляющему трансформатору, в резонанс с емкостью сети / **Р.А. Вайнштейн**, Б.Г. Третьяков // Заявлено 30.04.1987. Оpubл. 30.08.1989. Бюл. №32.
44. А.с. 1492409 СССР. МПК H02H 3/16. Устройство для защиты от замыканий на землю / **Р.А. Вайнштейн**, А.Ф. Карбышев // Заявлено 14.01.1987. Оpubл. 07.07.1989. Бюл. №25.
45. А.с. 1145401 СССР. МПК H02H 3/17. Устройство для защиты от замыканий на землю в сети с компенсированной нейтралью / **Р.А. Вайнштейн** // Оpubл. 15.03.1985. Бюл. №10.
46. А.с. 913517 СССР. МПК H02H 9/08. Способ измерения настройки дугогасящего реактора в резонанс с сетью и устройство для его осуществления / **Р.А. Вайнштейн**, Б.Г. Третьяков // Заявлено 30.07.1980. Оpubл. 15.03.1982. Бюл. №10.