

На правах рукописи



ПОНАМАРЕВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ
В ОБМОТКЕ СТАТОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ УКРУПНЁННОГО БЛОКА

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»
на кафедре «Электрические станции»

Научный руководитель: **Вайнштейн Роберт Александрович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Лавринович Валерий Александрович**
доктор технических наук

Глазырин Владимир Евлампиевич
кандидат технических наук, доцент

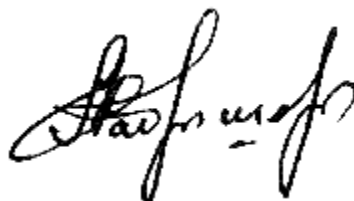
Ведущая организация: **ООО НПП «ЭКРА» г. Чебоксары**

Защита состоится «24» февраля 2010 г. в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «20» января 2010 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в обмотке статора синхронных генераторов является одной из важнейших видов защиты, так как большинство повреждений обмотки статора начинается со стадии однофазного замыкания. Отключение генератора при повреждении на этой стадии позволяет предотвратить переход ОЗЗ в двойное или междуфазное замыкание и тем самым предотвратить существенные повреждения обмотки статора, требующие длительного и дорогостоящего ремонта. Способ выполнения защиты от ОЗЗ определяется в основном первичной схемой соединения генераторов с другими элементами. Одной из часто применяемых на гидроэлектростанциях (ГЭС) схем является схема энергетического блока, в котором несколько генераторов работают параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора. Основное современное требование к защите от ОЗЗ таких укрупнённых блоков заключается в отсутствии зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали генератора. Ещё одним немаловажным свойством, которым должна обладать защита, является селективность.

Необходимость охвата ста процентов витков обмотки статора генератора продиктована тем, что в случае неконтролируемого замыкания вблизи нейтрали рассматриваемой обмотки существует вероятность возникновения ещё одного замыкания в другой точке обмотки, то есть замыкания фазы на нейтраль. Ток в месте повреждения в этом случае может превысить ток трёхфазного замыкания на выводах генератора. При этом возникают серьёзные повреждения как самой обмотки, так и стали статора.

Требование селективной работы защиты связано с тем, что большинство генераторов, работающих в блоке, имеют собственный выключатель, поэтому целесообразно в случае возникновения ОЗЗ в статорной обмотке одного из генераторов блока, отключать именно повреждённый генератор, а не весь блок. При этом наносится минимальный ущерб режиму электроснабжения и отпадает необходимость в отыскании повреждённого генератора.

По принципу действия обоим требованиям удовлетворяет защита, основанная на наложении на первичные цепи генераторов контрольного тока с частотой, отличающейся от промышленной. Различные технические варианты такой защиты разработаны в Томском политехническом университете и в НПП «ЭКРА». В то же время, для дальнейшего усовершенствования защиты, уточнения характеристик её измерительных органов, требуются дополнительные исследования электрических величин при дуговых перемежающихся замыканиях. Необходимость исследования электрических величин при дуговых перемежающихся замыканиях диктуется также тем, что процессы при таком виде повреждения в схеме укрупнённого блока имеют ряд особенностей, по сравнению с процессами в электрических распределительных сетях.

При выполнении работы автор использовал известные результаты исследований в области защиты от ОЗЗ, выполненных И.М. Сиротой, В.М. Кискачи,

А.И. Левиушем, В.Г. Алексеевым, А.И. Шалиным, специалистами НПП «ЭКРА» А.М. Наумовым и др.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является совершенствование защиты от ОЗЗ в обмотке статора гидрогенераторов укрупнённого блока на основе выявления особенностей электрических величин в схеме блока при перемежающихся дуговых замыканиях.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Обзор существующих методов и средств защиты от однофазных замыканий на землю в обмотке статора гидрогенератора и выявление тех из них, на основе которых может быть выполнена защита генераторов укрупнённого блока, удовлетворяющая предъявляемым к ней требованиям;
2. Анализ электрических величин с частотой 25 Гц в различных схемах укрупнённых блоков при устойчивых замыканиях на землю, для дальнейшего количественного сопоставления их с электрическими величинами при перемежающихся дуговых замыканиях;
3. Исследование закономерностей формирования гармонических составляющих токов нулевой последовательности в области низких частот при дуговых перемежающихся замыканиях в схеме укрупнённого блока;
4. Создание математической модели укрупнённого блока, а также модели дугового перемежающегося замыкания, позволяющих исследовать изменение электрических величин при возможном многообразии дуговых перемежающихся замыканий;
5. Выбор состава фильтров и частотных характеристик его отдельных звеньев измерительного органа защиты, при которых обеспечивается надёжная отстройка от возможных небалансов фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) и выполняется условие совместимости работы защиты при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях;
6. Выявление признаков, позволяющих выполнить селективную защиту от ОЗЗ, и исследование их устойчивости при изменении характера и условий протекания перемежающегося дугового замыкания.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием методов расчёта линейных и нелинейных электрических цепей; метода спектрального анализа электрических величин; метода математического моделирования с помощью ЭВМ.

Достоверность результатов полученных в диссертационной работе, подтверждается совпадением результатов исследований, выполненных аналитическими методами и на базе программных средств схемотехнического моделирования.

Научная новизна. В работе содержатся следующие новые научные результаты:

1. Установлено, что при перемежающихся дуговых замыканиях в схеме укрупнённого блока генератор-трансформатор токи нулевой последовательности на выводах генератора и в нейтрали, в цикле пробой изоляции - погасание

дуги, протекают в разные моменты времени. Поэтому для их сравнения, при реализации селективной защиты, необходимо либо запоминать эти токи, либо производить их фильтрацию в области низких частот.

2. Показано, что при перемежающихся дуговых замыканиях на выводах генератора укрупнённого блока переходные процессы разряда ёмкости повреждённой фазы и дозаряда ёмкостей неповреждённых фаз идентичны в количественном и качественном отношении, так как параметры эквивалентных контуров для этих процессов одинаковы.

3. Исследование закономерностей формирования гармоник с частотой ниже промышленной на выводах генератора при перемежающихся дуговых замыканиях показало, что основное влияние на амплитуды этих гармоник оказывают время горения дуги и коэффициент затухания переходного ёмкостного тока.

4. При изменении пробивного напряжения выявлен следующий важный эффект, заключающийся в том, что одновременно с изменением интенсивности переходных процессов изменяется и частота следования пробоев, что приводит к некоторой самостабилизации амплитуд низкочастотных гармоник.

Практическое значение и реализация результатов работы.

Полученные в работе результаты по исследованию электрических процессов при перемежающихся дуговых замыканиях необходимы для уточнения частотных характеристик измерительных органов защиты, а так же для проведения заводских испытаний выпускаемых защит. Результаты исследований переданы НПП «ЭКРА» для их использования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При перемежающихся дуговых замыканиях в схеме укрупнённого блока генератор-трансформатор токи нулевой последовательности на выводах генератора и в нейтрали, в цикле пробой изоляции - погасание дуги, существуют в разные моменты времени. Для их сравнения, при реализации селективной защиты, необходимо либо запоминание токов, либо их фильтрация в области низких частот.

2. Переходные процессы разряда ёмкости повреждённой фазы и дозаряда ёмкостей неповреждённых фаз, при перемежающихся дуговых замыканиях на выводах генератора укрупнённого блока, идентичны в количественном и качественном отношении, так как параметры эквивалентных контуров для этих процессов одинаковы.

3. На амплитуды гармоник с частотой ниже промышленной на выводах генератора при перемежающихся дуговых замыканиях основное влияние оказывают время горения дуги и коэффициент затухания переходного ёмкостного тока.

4. При изменении пробивного напряжения имеет место эффект самостабилизации амплитуд гармоник за счёт одновременного изменения интенсивности переходных процессов и частоты следования пробоев.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках следующих мероприятий: международная научно-

практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2007, 2008 г.г.); научные семинары кафедры «Электрические станции» Электротехнического института Томского политехнического университета (г. Томск, 2007, 2008, 2009 г.г.); научно-технический совет Электротехнического института Томского политехнического университета (г. Томск, 2007, 2008, 2009 г.г.).

Публикации. По направлению диссертационной работы автором опубликовано 9 работ, в том числе: 3 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК; 5 статей материалы докладов конференций; 1 работа депонирована.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 45 наименований и содержит 91 рисунок. Общий объем диссертации 149 стр.: текст диссертации 144 стр., список литературы 5 стр.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены основные принципы выполнения защиты от ОЗЗ в укрупнённых блоках и произведён выбор такого из них, на основании которого возможно выполнить селективную стопроцентную защиту от ОЗЗ, работающую как при устойчивых, так и при перемежающихся дуговых замыканиях.

Выполнить селективную стопроцентную защиту в укрупнённых блоках гидрогенераторов при устойчивых замыканиях, по-нашему мнению, возможно только с наложением контрольного тока. Поскольку в настоящее время имеется опыт эксплуатации в различных электроустановках защит от ОЗЗ с наложением контрольного тока с частотой 25 Гц, нами за основу принят именно этот метод.

Известно применение такой защиты на некоторых ГЭС для блоков с двумя или четырьмя генераторами, нейтрали которых заземлены через дугогасящие реакторы (ДГР). Опыт эксплуатации показывает, что при повреждении изоляции обмотки статора могут иметь место дуговые перемежающиеся замыкания. Для примера на рис. 1 показана запись процесса дугового замыкания в обмотке статора гидрогенератора Красноярской ГЭС.

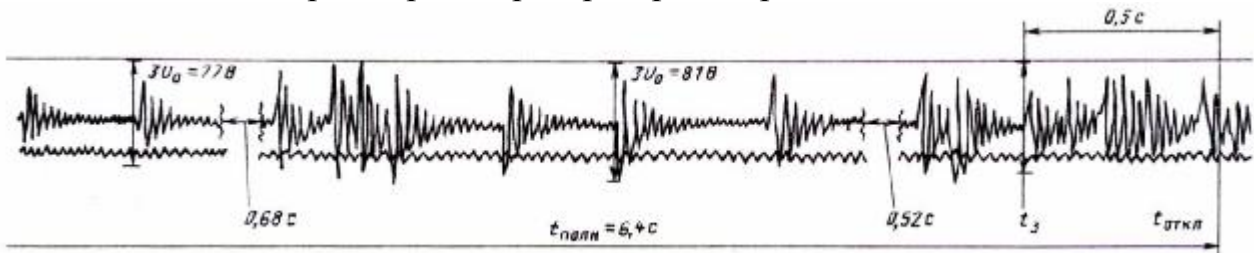


Рис. 1. Осциллограмма напряжения нулевой последовательности при перемежающемся замыкании в обмотке статора гидрогенератора Красноярской ГЭС

При применении метода наложения контрольного тока для выполнения защиты от ОЗЗ важнейшим условием является совместимость работы защиты при устойчивых и дуговых перемежающихся замыканиях.

В электроустановках с компенсацией ёмкостного тока частота следования пробоев при перемежающихся дуговых замыканиях намного ниже промышленной, благодаря чему в токах и напряжениях нулевой последовательности содержатся низкочастотные гармонические составляющие. Это обстоятельство является принципиальной основой для решения задачи совмещения условий работы защиты при устойчивых и перемежающихся замыканиях. Предварительный упрощённый анализ распределения токов нулевой последовательности под действием несинусоидального напряжения нулевой последовательности, подключенного в месте замыкания, показывает, что направления токов с частотой ниже промышленной в ветвях схемы укрупнённого блока совпадают с направлением токов с частотой 25 Гц при устойчивом замыкании.

Вторая глава посвящена анализу электрических величин с частотой 25 Гц в различных схемах укрупнённых блоков при устойчивом замыкании в одном из генераторов рассматриваемого блока. Необходимость данных исследований продиктована тем, что, во-первых, это позволяет учесть все возможные схемы укрупнённых блоков, и, во-вторых, обеспечивает возможность количественного сопоставления электрических величин при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях.

На рис. 2 представлен укрупнённый блок Усть-Илимской ГЭС, состоящий из двух гидрогенераторов. При исследовании изменения электрических величин с частотой 25 Гц в данном блоке одним из важных обстоятельств явилось то, что в нормальном режиме по выводам генераторов протекает ток, обусловленный неидентичностью параметров схемы нулевой последовательности блока. Выражение для определения данного тока следующее:

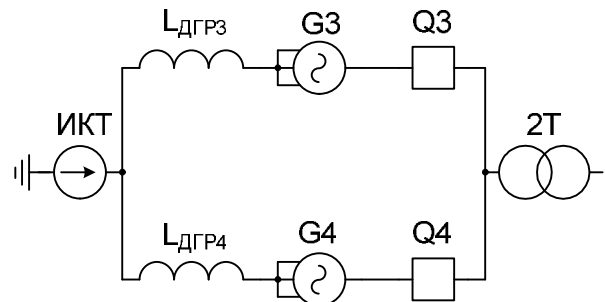


Рис. 2. Схема укрупнённого блока Усть-Илимской ГЭС

$$I_{\text{выв}} = \frac{U_{25}}{\omega_{25} L_3} \cdot \frac{v_4 - v_3}{L_{4*}(4v_3 - 3)(1 - v_4) + L_{3*}(4v_4 - 3)(1 - v_3)}, \quad (1)$$

где U_{25} - напряжение ИКТ; L_3 - эквивалентная индуктивность обоих ДГР; L_{3*}, L_{4*} - индуктивности ДГР, отнесённые к эквивалентной индуктивности; v_3, v_4 - расстройка компенсации по индивидуальным параметрам генераторов.

Из выражения (1) видно, что значение тока на выводах возможно свести к минимуму соответствующей настройкой ДГР.

При проведении анализа изменения электрических величин с частотой 25 Гц в элементах блока при возникновении устойчивого замыкания в одном из генераторов через переходное сопротивление, величина которого изменялась от ∞ до 0, получены годографы токов с частотой 25 Гц, представленные на рис. 3.

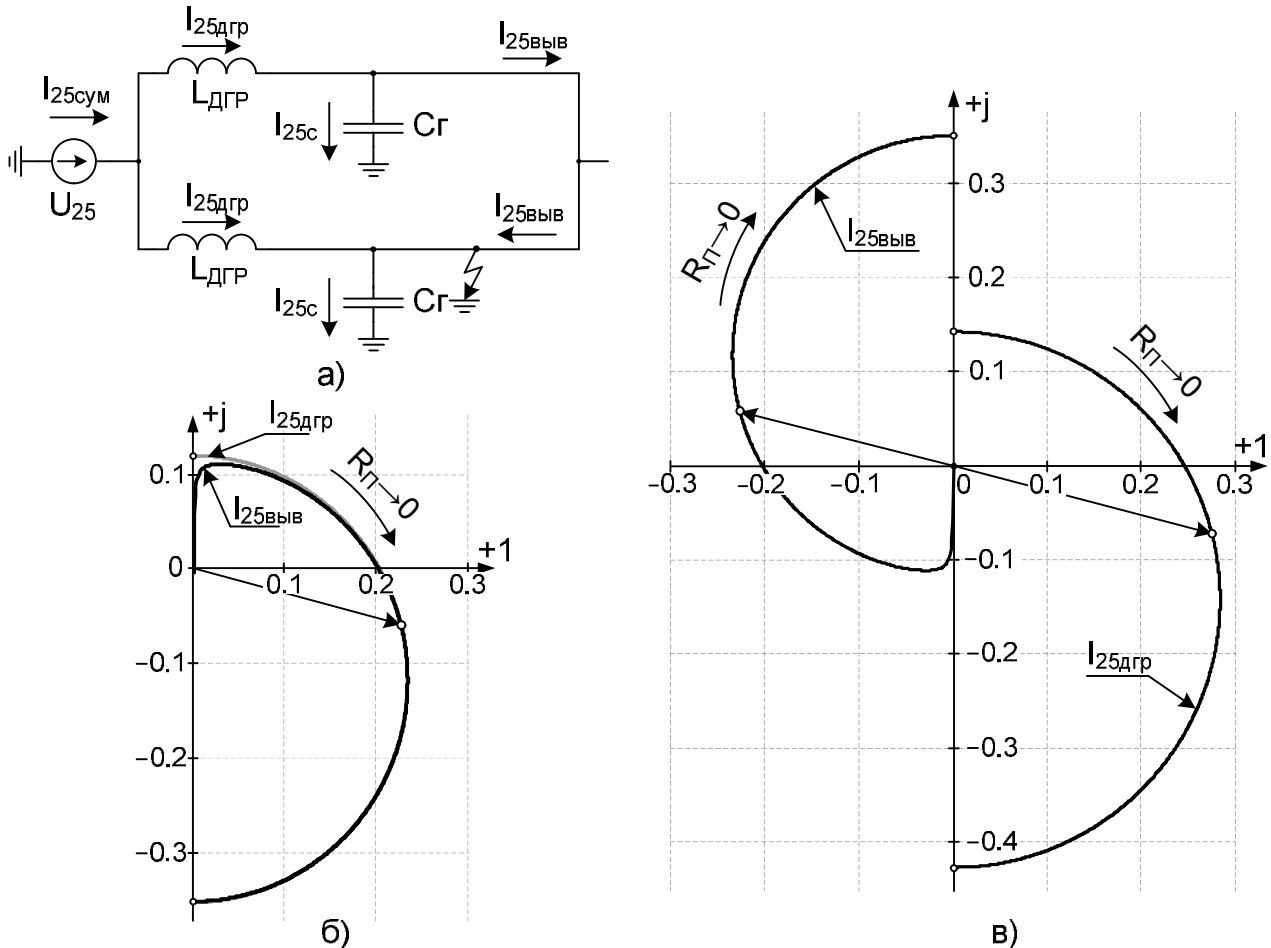


Рис. 3. Схема замещения нулевой последовательности блока (а), годографы токов на выводах $I_{25\text{выв}}$ и со стороны нейтрали $I_{25\text{дгр}}$ у неповреждённого (б) и повреждённого (в) генератора

Как видно из рис. 3, у повреждённого генератора направление токов с частотой 25 Гц различно во всём диапазоне изменения переходного сопротивления. У неповреждённого генератора наоборот, практически во всём диапазоне изменения переходного сопротивления токи со стороны нейтрали и со стороны выводов совпадают по направлению и равны по абсолютному значению. Небольшое различие токов имеет место при больших переходных сопротивлениях из-за отклонения тока в ёмкость генератора.

На годографах выделены векторы, соответствующие переходному сопротивлению, при котором абсолютная величина токов меньше максимально возможного значения (при $R_{\text{п}} = 0$) в 1,5 раза. То есть принимаем, что по измеряемым токам защита должна иметь коэффициент чувствительности около 1,5. Соотношения направлений токов в ветвях схемы блока позволяют выполнить защиту при устойчивых замыканиях по дифференциальному принципу.

При рассмотрении укрупнённого блока, состоящего из 4-х генераторов, нейтрали которых заземлены через ДГР, установлено, что закономерности изменения тока с частотой 25 Гц по элементам схемы, выявленные в блоке из двух генераторов, проявляются и в этом случае.

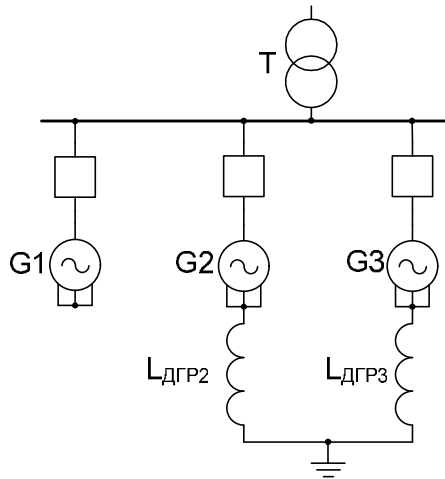


Рис. 4. Схема укрупнённого блока Камской ГЭС

Следующая рассмотренная схема укрупнённого блока – это схема блока, у которого нейтрали части генераторов изолированы или имеется гальванически связанная внешняя сеть. Примером такой схемы является укрупнённый блок Камской ГЭС, приведённый на рис. 4.

Емкость генератора, не имеющего ДГР в нейтрали, приводит к протеканию тока с частотой 25 Гц по выводам генераторов в нормальном режиме. Расчёты различных режимов блоков позволили выявить наибольшие значения этих токов, от которых

необходимо отстраивать защиту. При этом отмечено, что в случае, например, Камской ГЭС принципы выполнения защиты генераторов блока различны. Для генераторов с ДГР в нейтрали может быть применён дифференциальный принцип, а для генераторов без ДГР – максимальный токовый.

В третьей главе проведены исследования закономерностей формирования гармонических составляющих токов нулевой последовательности в области низких частот при дуговых перемежающихся замыканиях в схеме укрупнённого блока.

При дуговом перемежающемся замыкании периодически сменяют друг друга стадии горения дуги после очередного пробоя изоляции (зажигания дуги) и бестоковая пауза от момента погасания дуги до момента следующего пробоя.

После каждого очередного пробоя изоляции имеют место переходные процессы разряда ёмкости повреждённой фазы и дозаряда ёмкостей неповреждённых фаз (далее называемые просто процессы разряда и дозаряда). В бестоковую паузу происходит стекание накопившихся на ёмкостях фаз избыточных зарядов через дугогасящие реакторы.

На рис. 5 представлена схема замещения блока из двух генераторов с распределением токов, обусловленных изменением зарядов фаз сети при дуговом замыкании в одном из генераторов блока. Как видно из рисунка, сумма токов фаз, то есть ток нулевой последова-

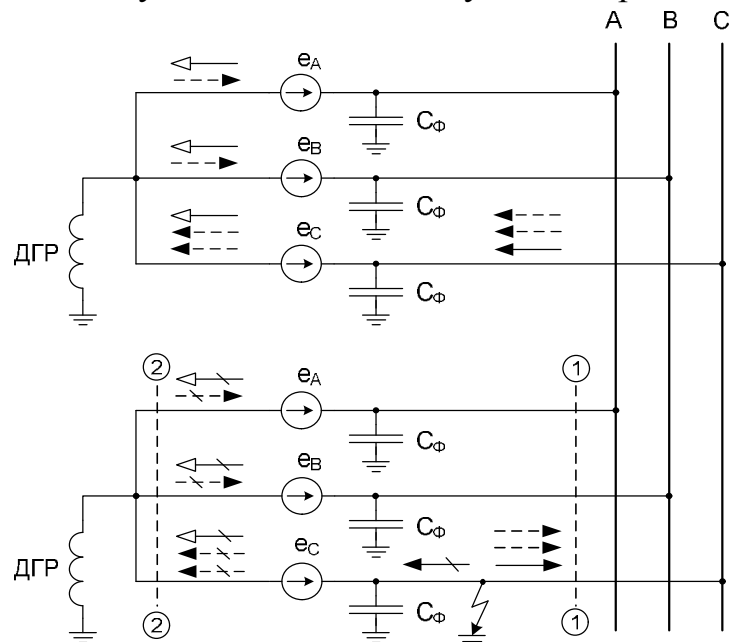


Рис. 5. Токи обусловленные изменением зарядов фаз сети при дуговом замыкании в укрупнённом блоке из двух генераторов: $\rightarrow \dashrightarrow \rhd$ - токи разряда, дозаряда и стекания избыточных зарядов ёмкостей фаз неповреждённого элемента; $\rightarrow \dashrightarrow \rhd$ - то же повреждённого элемента

тельности, на выводах генераторов (сечение 1-1) обусловлена только токами стадии горения дуги, а в нейтрали (сечение 2-2) только токами стекания избыточных зарядов, т.к. токи стадии горения дуги со стороны нейтрали компенсируются. Следовательно можно констатировать тот факт, что в ФТНП, установленных на выводах и в нейтрали, токи протекают в разные временные интервалы.

Обмотка статора, каждый элемент которой имеет определённую ёмкость относительно земли, определённую продольную индуктивность и активное сопротивление, является системой с распределёнными параметрами, которая может быть представлена как многоконтурная схема. В такой схеме как токи разряда, так и токи дозаряда протекают по одинаковым цепочечным схемам и поэтому характер этих токов практически одинаков. Переходный процесс в такой схеме является многочастотным. Пример такого процесса, полученного на математической модели блока, представлен на рис. 6.

Существенно, что в данном процессе просматривается некоторая основная частота. Это даёт основание при дальнейших исследованиях принимать, что переходный ток в месте замыкания переходит через ноль в моменты, соответствующие примерно целому числу полупериодов основной частоты переходного процесса (t_1, t_2 на рис. 7) или при переходе через ноль принуждённой составляющей тока (t_3 на рис. 7).

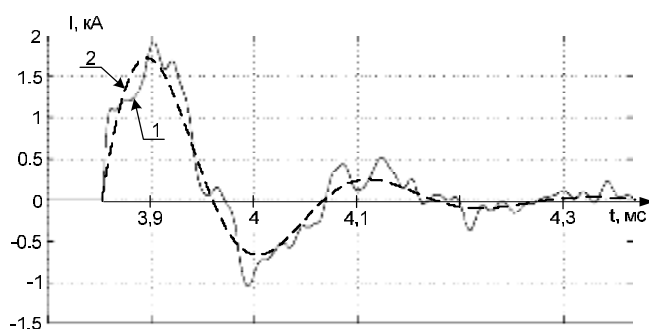


Рис. 6. Осциллограмма тока при ОЗЗ на выводах генератора: 1 – кривая мгновенных значений; 2 – основная частота

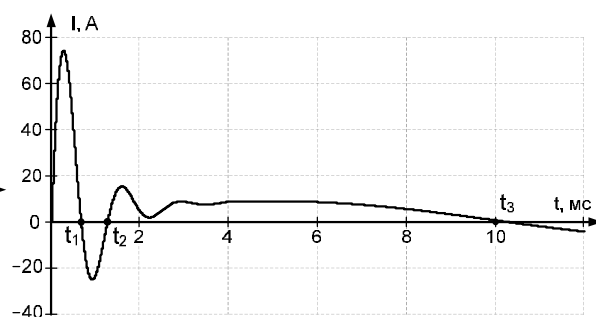


Рис. 7. Ток в месте замыкания при ОЗЗ и характерные моменты времени, при которых возможно погасание дуги

Для анализа различных факторов, влияющих на формирование амплитуд низкочастотных гармоник, ток на стадии горения дуги, протекающий по выводам генераторов, представлен как одночастотный затухающий процесс в виде:

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

где $U_{пр}$ - напряжение пробоя; ω_d и δ - угловая частота и коэффициент затухания переходного ёмкостного тока; C_ϕ - ёмкость фазы генератора; $t_{пр}$ - значение времени в момент пробоя; $i_{B\infty}$ - принуждённый ток в месте замыкания.

Далее принимаем, что дуга гаснет при одном из переходов тока замыкания через ноль. При этом, во-первых, время существования этого тока намного

меньше периода следования пробоев, а следовательно и периода основной гармоники. Во-вторых, характер тока по (2) и период следования пробоев определяются разными факторами, кроме пробивного напряжения, которое влияет только на начальные амплитуды переходных токов. При таких условиях анализ удобно проводить по спектральной функции:

$$F(j\omega) = \int_{t_{пр}}^{t_{гаш}} i_B \cdot e^{j\omega t} dt,$$

где $t_{гаш}$ - время в момент гашения дуги.

Зависимость спектральной функции F от относительного значения коэффициента затухания и момента гашения дуги представлена на рис. 8. Из рисунка видно, что при прочих равных условиях наибольшее значение F , которое пропорционально площади под кривой мгновенного значения тока, имеет место при $n=1$ (где n - число полупериодов основной гармоники переходного процесса), а наименьшее при $n=2$. Зависимость F от момента погасания дуги ослабляется с ростом коэффициента затухания δ .

Изменение пробивного напряжения одновременно влияет на интенсивность переходных процессов и на период следования пробоев. Эти два фактора влияют на амплитуды гармоник в противоположных направлениях, что приводит к некоторой самостабилизации амплитуд. На рис. 9 показано, что при изменении пробивного напряжения в 2 раза амплитуды гармоник изменяются всего в 1,3 раза.

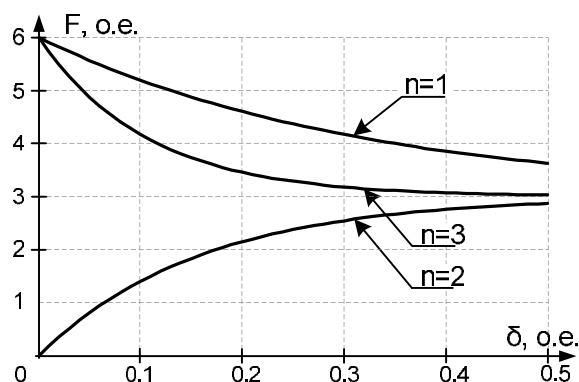


Рис. 8. Зависимость спектральной функции F , отнесенной к величине $C_\phi U_{пр}$, от относительного значения коэффициента затухания и момента гашения дуги

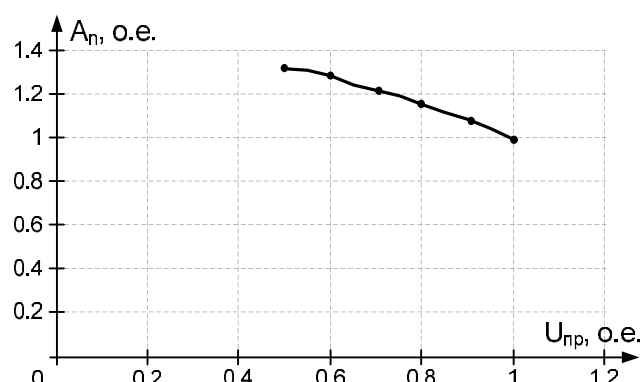


Рис. 9. Зависимость амплитуд низкочастотных гармоник в токе на выводах генераторов от пробивного напряжения: $\delta = 0, 2$; $\omega_d = 5000$ Гц; $n = 2$

После погасания дуги имеет место процесс стекания через дугогасящие реакторы избыточных зарядов с ёмкостей фаз сети, накопившихся за время горения дуги. В электроустановках с компенсацией ёмкостного тока ток стекания имеет вид затухающих колебаний, частота и коэффициент затухания которых соответственно равны:

$$\omega_{ст} = \omega \sqrt{(1-\nu) - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad \delta_{ст} = \frac{d}{2} \omega,$$

где ω - промышленная частота; ν - суммарная расстройка компенсации;

d - коэффициент демпфирования.

Выражение для тока стекания имеет следующий вид:

$$i_{\text{ст}} = U_{\text{Nm}} e^{-\frac{d}{2}(t-t_{\text{гаш}})} 3C_{\phi} \omega_{\text{ст}} \sin[\omega_{\text{ст}}(t-t_{\text{гаш}}) + \varphi_{\text{N0}}],$$

где U_{Nm} и φ_{N0} - начальная амплитуда напряжения на нейтрали и начальная фаза тока стекания избыточных зарядов.

Величины U_{Nm} и φ_{N0} определяются мгновенными значениями напряжения на нейтрали u_{Nr} и тока дугогасящего реактора $i_{\text{ЛГ}}$ в момент гашения дуги. Для случая, когда дуга гаснет при прохождении переходного тока через ноль, напряжение в момент гашения дуги определяется из выражения при $t = t_{\text{гаш}}$:

$$u_{\text{Nпер}} = U_{\text{пр}} e^{-\delta(t-t_{\text{пр}})} \left[\cos\left(\sqrt{\omega_{\text{д}}^2 - \delta^2}\right)(t-t_{\text{пр}}) + \frac{\delta}{\sqrt{\omega_{\text{д}}^2 - \delta^2}} \sin\left(\sqrt{\omega_{\text{д}}^2 - \delta^2}\right)(t-t_{\text{пр}}) \right] + U_{\text{N}\infty}.$$

Графическое пояснение к определению напряжения на нейтрали к моменту погасания дуги приведено на рис. 10.

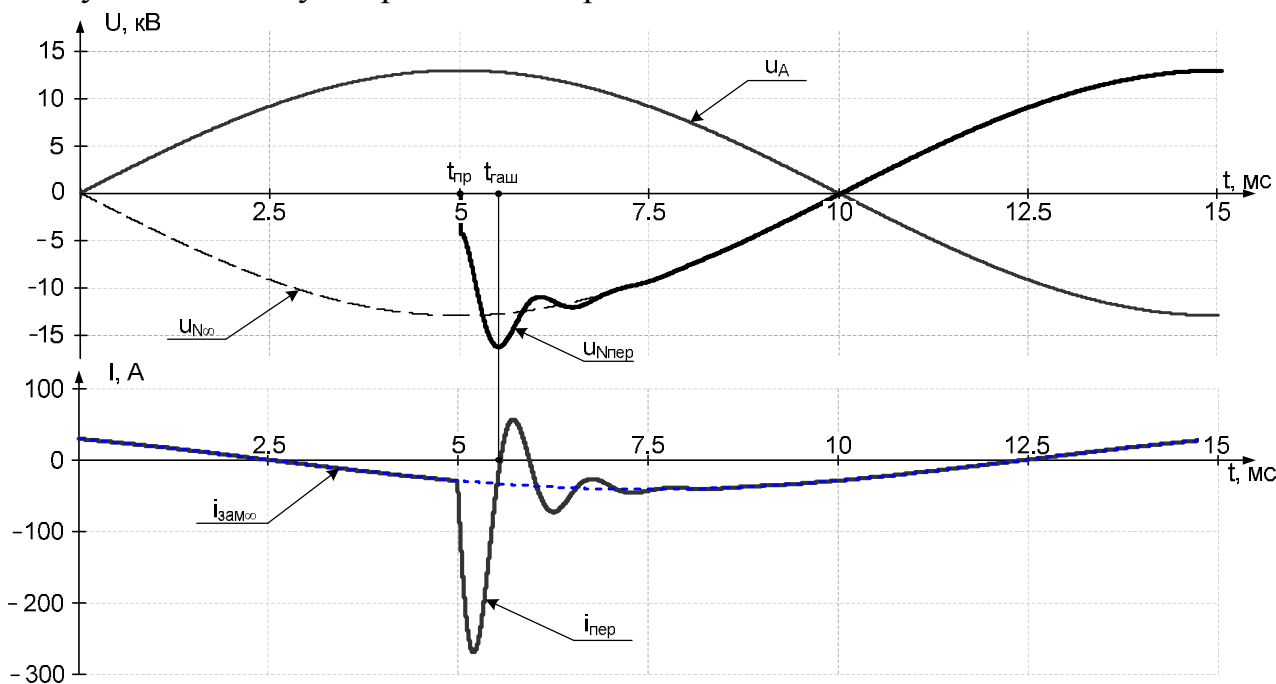


Рис. 10. Кривые токов и напряжений при дуговом замыкании, поясняющие определение напряжения на нейтрали к моменту гашения дуги

После выявления факторов, оказывающих влияние на формирование спектров токов различных стадий горения дуги, была проведена серия расчётов амплитудно-частотных и фазо-частотных спектров токов нулевой последовательности для различных случаев протекания дугового замыкания. Расчётные спектры одного из характерных случаев приведены на рис. 11. Параметры рассматриваемого процесса следующие: дуга гаснет при первом переходе тока замыкания через ноль ($n=1$); пробивное напряжение близко к амплитуде фазного напряжения $U_{\text{пр}} \approx U_{\text{фм}}$; $\nu = -0,05$; $d = 0,05$; $\omega_{\text{д}} = 1,885 \cdot 10^4$ 1/с ($f_{\text{д}} = 3000$ Гц); $\delta = 5,498 \cdot 10^{-3}$ 1/с.

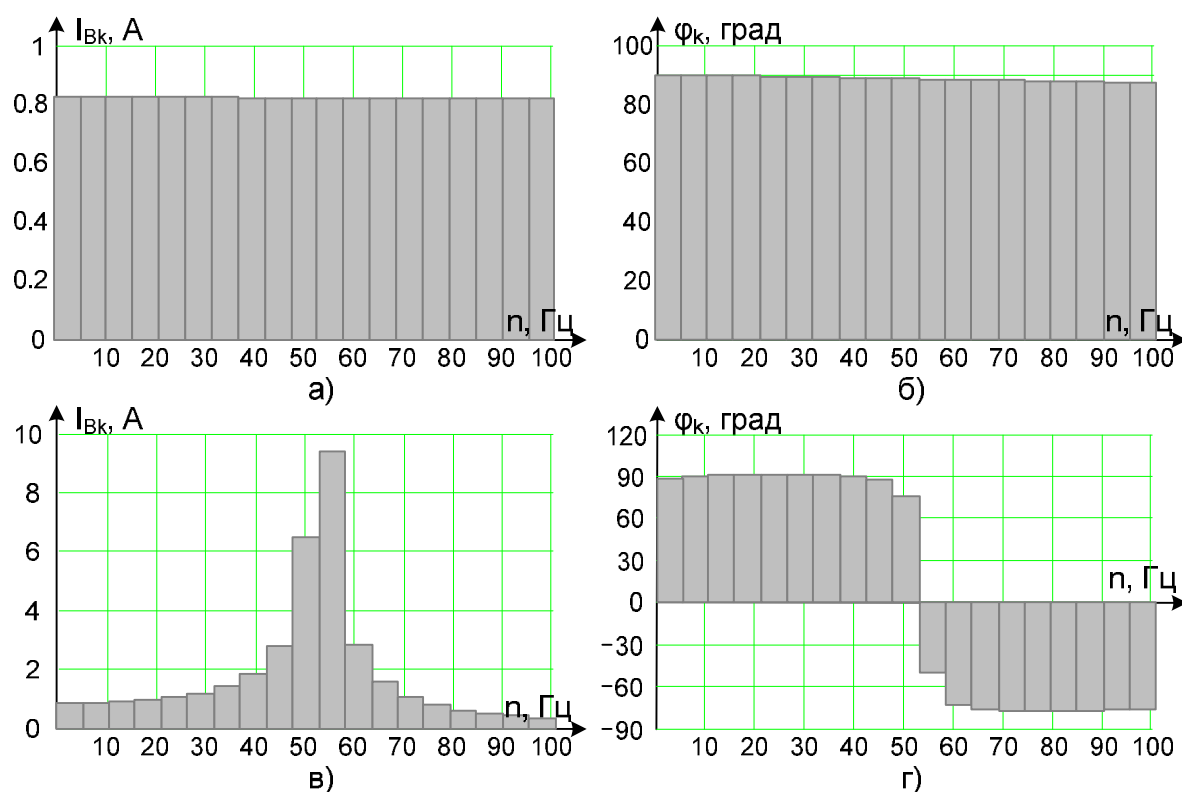


Рис. 11. Амплитудно-частотный (а) и фазо-частотный (б) спектры тока нулевой последовательности стадии горения дуги; (в) и (г) аналогичные спектры стадии стекания избыточных зарядов

Анализ полученных результатов показал, что расчётные фазы гармонических составляющих в области частот ниже промышленной как токов на выводах генераторов, так и токов со стороны нейтрали практически одинаковы ($\approx 90^\circ$). Поэтому признак различий направлений токов низких частот на выводах и в нейтрали генераторов может быть использован без каких-либо дополнительных фазовых преобразований. Данный признак по фазе сохраняется совершенно определённо и при других условиях перемежающихся дуговых замыканий. Однако амплитуды гармоник в области низких частот при различных видах дугового замыкания значительно отличаются друг от друга. В рассмотренных в работе расчётных случаях амплитуды гармоник при одних и тех же частотах отличаются примерно в 2 раза. Это обстоятельство далее учитывается при рассмотрении вариантов выполнения защиты.

В четвёртой главе описана разработанная математическая модель процессов при перемежающихся дуговых замыканиях в схеме укрупнённого блока. Модель разработана с целью получения возможности исследования электрических величин при дуговых перемежающихся замыканиях с учётом возможного многообразия факторов, влияющих на рассматриваемые процессы. Наиболее важным элементом модели является модель дугового промежутка, который представлен в виде идеального ключа, алгоритм управления которым следующий:

1. Ключ замыкается при достижении заданного пробивного напряжения на поврежденной фазе;

2. Для учёта изменения электрической прочности дугового промежутка после погасания дуги предусмотрена возможность задания изменения пробивного напряжения за время между двумя соседними пробоями;

3. Погасание дуги происходит при одном из задаваемых при расчёте переходов тока в месте замыкания через значение близкое к нулю.

Моделирование дугового промежутка и схемы замещения укрупнённого блока проводилось в среде визуального программирования MATLAB Simulink. Для учёта распределённости параметров каждая фаза статорной обмотки генератора представлена в виде пяти Г-образных RLC ячеек. Со стороны выводов и со стороны нейтрали генераторов в модели предусмотрены ФТНП, состоящие из однофазных трансформаторов тока. Для примера на рис. 12 приведены полученные на разработанной модели осциллограммы.

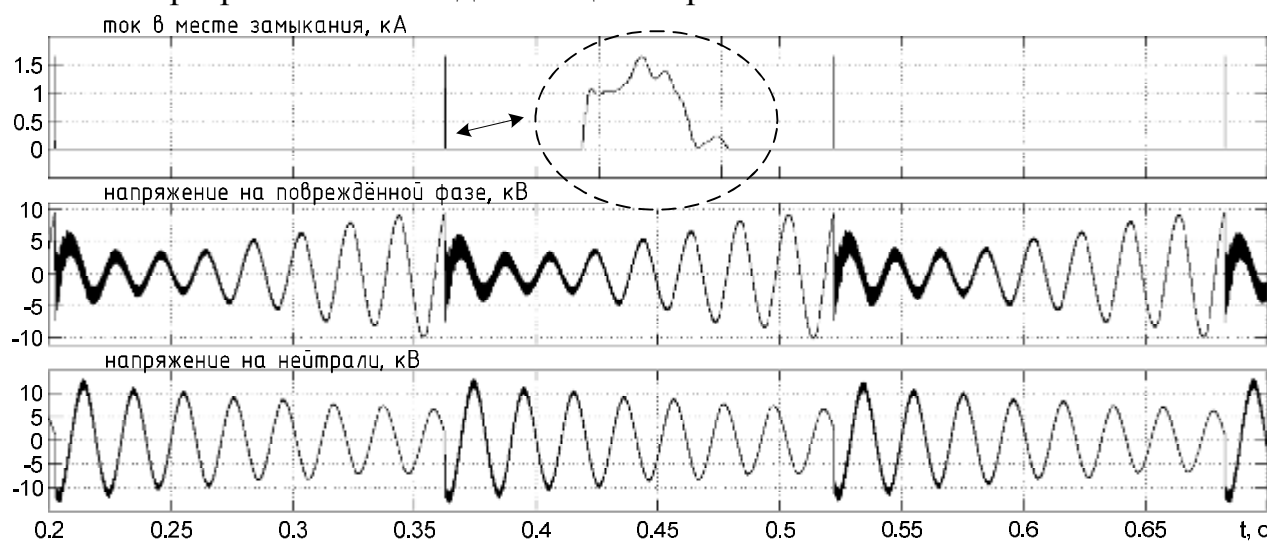


Рис. 12. Осциллограмма перемежающегося дугового замыкания на математической модели укрупнённого блока Усть-Илимской ГЭС при расстройке компенсации $\nu = 5\%$

Разработанная модель процессов при перемежающихся дуговых замыканиях даёт расчётные результаты, хорошо согласующиеся с известной картиной переходных процессов, имеющих место в реальных электроустановках. Поэтому эта модель может использоваться для решения задачи усовершенствования защиты от замыкания на землю.

Пятая глава посвящена разработке элементов технической реализации защиты от ОЗЗ. В частности выбрана структура (см. рис. 13) и сформулированы требования к частотным фильтрам, для выделения тока с частотой 25 Гц на фоне помех, основную часть которых составляет небаланс ФТНП.

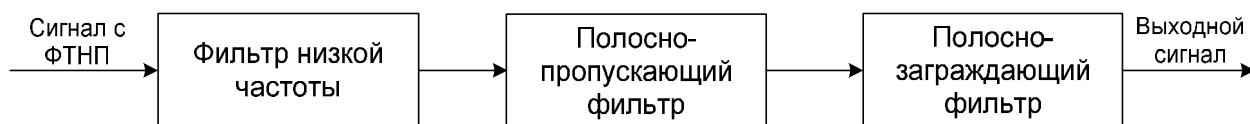


Рис. 13. Предлагаемая структура фильтрации сигнала для выполнения защиты при устойчивых замыканиях

Исходные данные для выбора частотных характеристик фильтров:

– минимально возможное значение полезного сигнала с частотой 25 Гц при устойчивом замыкании;

- максимально возможное значение тока небаланса ФТНП с учётом возможного изменения частоты в диапазоне $45 \div 55$ Гц;
- амплитудно-частотные спектры токов на выводах и в нейтрали генератора, полученные ранее.

Выбор параметров фильтров проводился для наиболее тяжёлого случая, в частности для укрупнённого блока Усть-Илимской ГЭС. Значение вторичного контрольного тока с частотой 25 Гц составляет 0,146 мА, а максимальное значение тока небаланса составляет 34 мА. При назначении максимального значения тока небаланса принималось во внимание, что при дифференциальной схеме включения измерительного органа токи небаланса ФТНП могут суммироваться, так как их фаза является случайной.

Кроме этого фильтры должны выполнить функцию совмещения по времени сигналов с выводов и с нейтрали генератора, которые физически существуют в разные интервалы времени. При прочих равных условиях принимались фильтры с наименьшим временем затухания переходных процессов в них.

При рассмотрении различных комбинаций фильтров были выбраны следующие звенья: фильтр низкой частоты (ФНЧ) третьего порядка с частотой среза 32 Гц; полосно-пропускающий фильтр (ППФ) 2-го порядка с центральной частотой пропускания 25 Гц и добротностью $Q=1$, и два полосно-заграждающих фильтра (ПЗФ) четвёртого порядка с частотами наибольшего подавления 48 и 52 Гц и добротностями соответственно $Q_1=1,2$ и $Q_2=1$. Результирующие характеристики фильтров представлены на рис. 14.

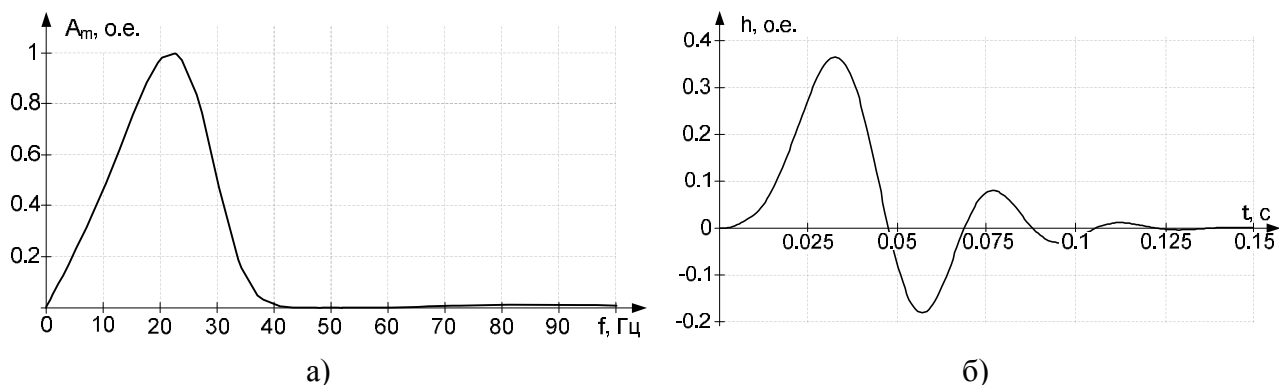


Рис. 14. Результирующая амплитудно-частотная (а) и переходная (б) характеристики фильтра

При одновременной подаче на вход фильтров сигнала с частотой 25 Гц и сигнала помехи с частотой из полосы $45 \div 55$ Гц указанных выше уровней, на выходе фильтров получаем сигнал 25 Гц, превосходящий сигнал помехи не менее чем в 10 раз. Последнее условие также было задано при выборе частотных характеристик фильтров.

Выходной сигнал с частотой 25 Гц при устойчивом замыкании далее сопоставляется с выходными сигналами при перемежающихся дуговых замыканиях для выявления степени совместимости работы защиты при данных видах повреждения.

Как отмечалось выше, важным требованием к фильтрам является обеспечение совместимости по времени токов с выводов и с нейтрали генераторов,

которые, во-первых, протекают в разные временные интервалы, и, во-вторых, очень сильно отличаются по форме мгновенных значений. Реакция фильтров при подаче на них токов с выводов и с нейтрали иллюстрируется на рис. 15.

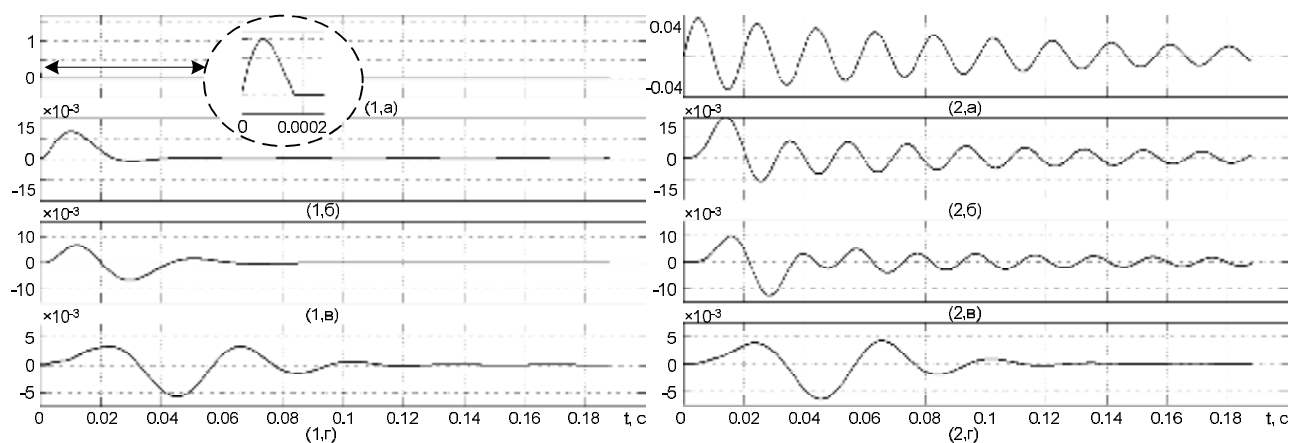


Рис. 15. Иллюстрация работы фильтров при подаче на вход токов с выводов (1, а-г) и с нейтрали (2, а-г) генератора: а) сигнал на входе фильтров; б) сигнал после ФНЧ; в) сигнал после ППФ; г) сигнал после ПЗФ (на выходе фильтров)

Как видно после прохождения всех звеньев фильтров сравниваемые сигналы имеют практически одинаковую форму. Совместимость сигналов после фильтров подтверждается также и сравнением их амплитудно-частотных спектров, представленных на рис. 16.

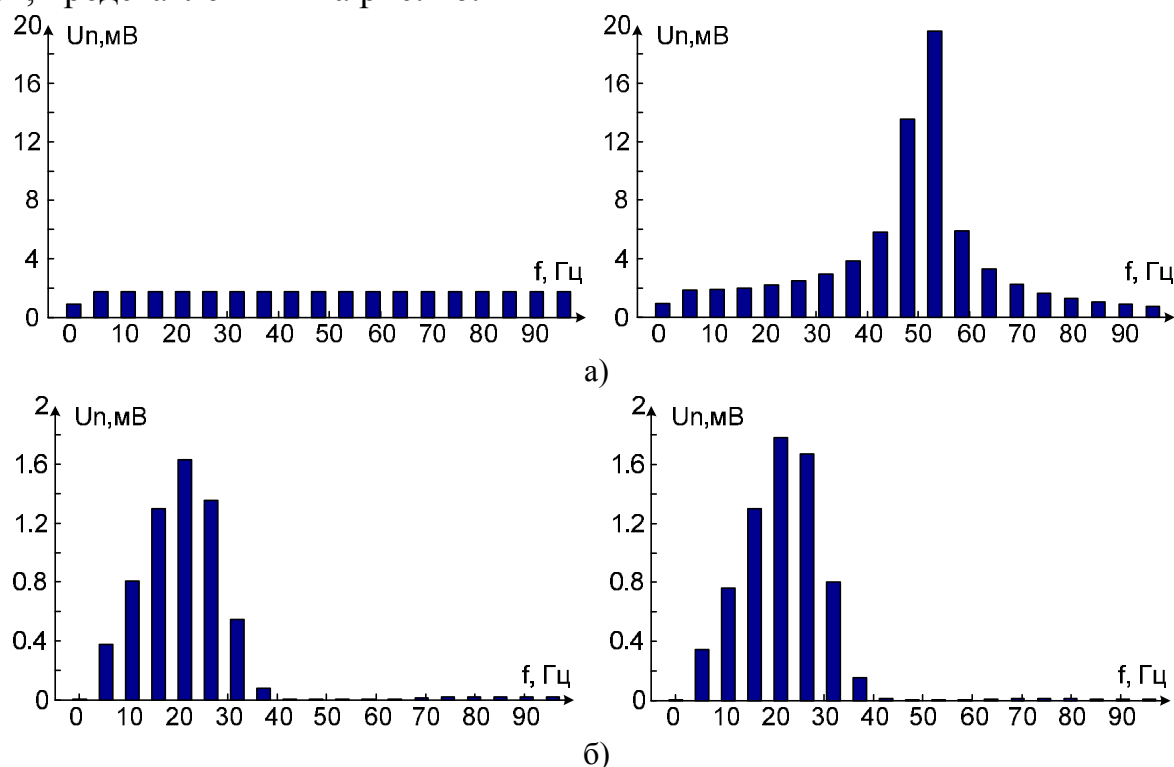


Рис. 16. Спектры сигналов тока дозаряда и тока стекания соответственно:
а) на входе фильтров; б) на выходе фильтров

Аналогичные результаты получены и при проведении расчётных экспериментов на разработанной математической модели. Отличие условий эксперимента от аналитического расчёта заключается в том, что входные сигналы содержат ток небаланса ФТНП.

Осциллограммы первичных токов и амплитудно-частотные спектры вторичных токов одного из расчётов приведены на рис. 17 и рис. 18.

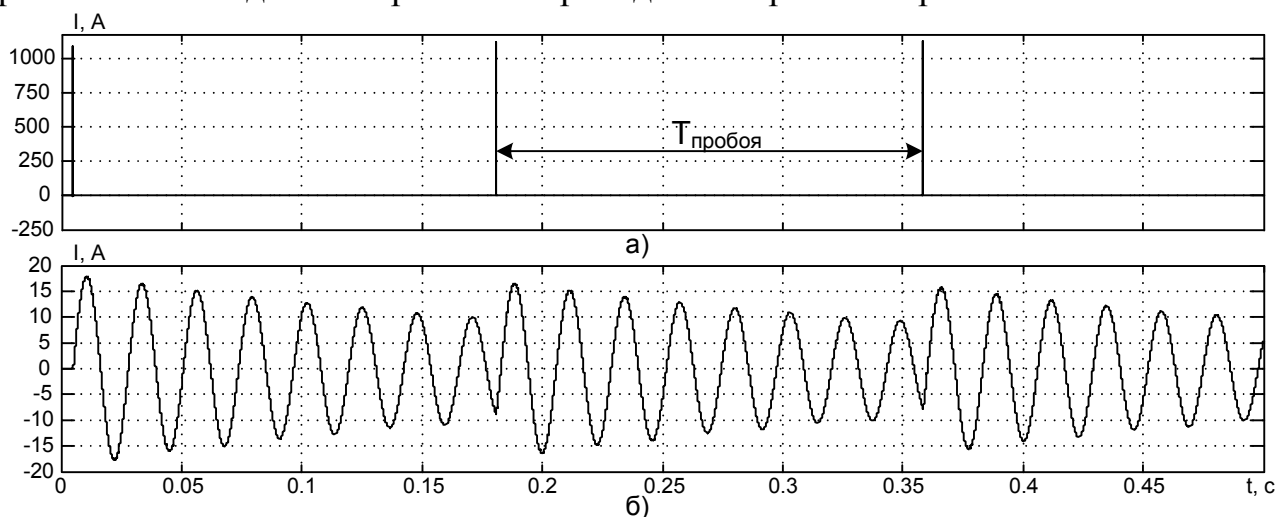


Рис. 17. Осциллограммы тока нулевой последовательности на выводах (а) и в нейтрали (б) генератора укрупнённого блока при перемежающемся дуговом замыкании в одном из генераторов математической модели

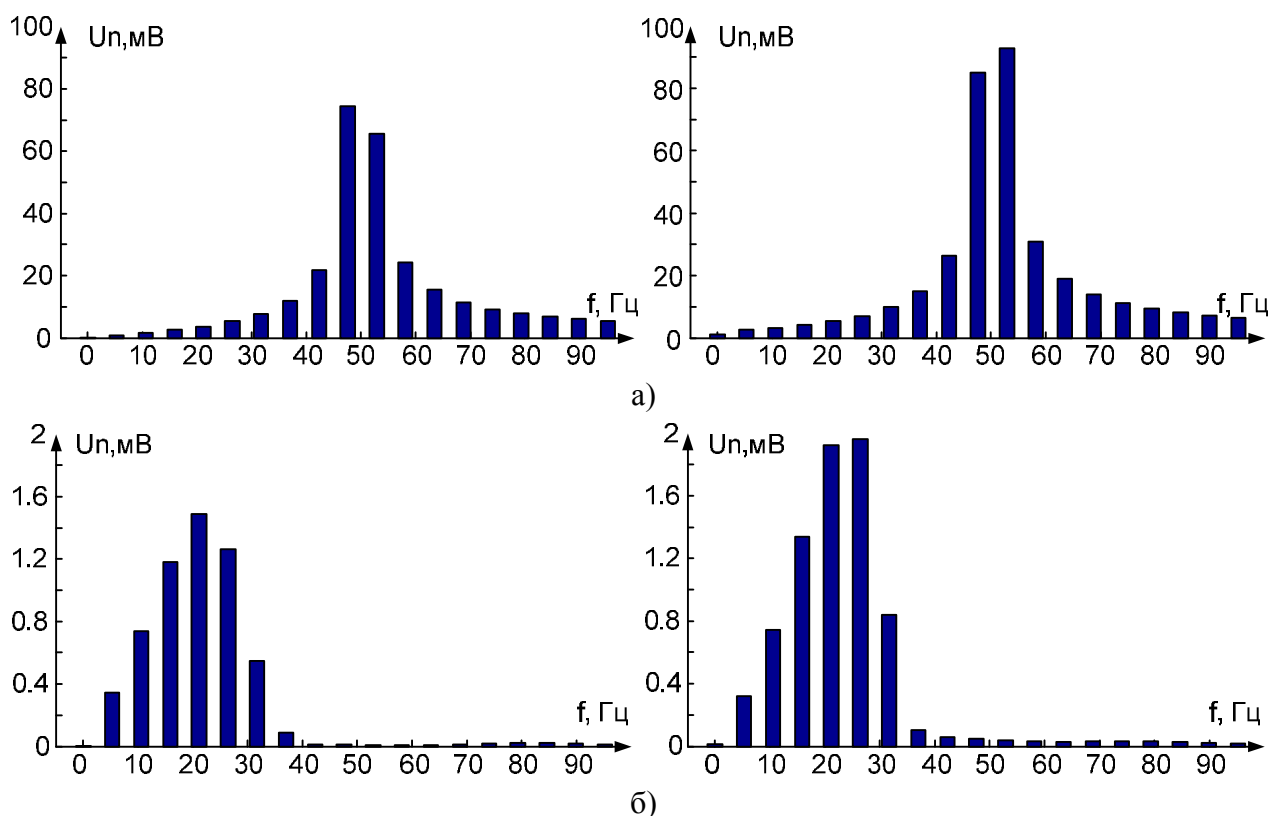


Рис. 18. Амплитудно-частотные спектры сигналов с выводов и с нейтрали генератора соответственно: (а) на входе и (б) на выходе фильтров

Действующие значения низкочастотных гармоник в блоке, у которого нейтрали всех генераторов заземлены через ДГР и общая расстройка компенсации не превышает $\pm 5\%$, отличаются не более чем в два раза, в зависимости от характера и условий протекания дугового замыкания.

Действующее значение сигнала с частотой 25 Гц в защите повреждённого генератора при устойчивом замыкании превышает действующее значение низ-

кочастотных гармоник при внешнем перемежающемся дуговом замыкании примерно в 1,5 раза.

Соотношения между сигналом при устойчивом замыкании и при перемежающемся дуговом замыкании могут отличаться в различных блоках, так как контрольный ток и уровень низкочастотных гармоник зависят от номинального напряжения генераторов и их ёмкостного тока, поэтому не во всех случаях условия чувствительности при устойчивом замыкании и отстройки от внешних перемежающихся дуговых замыканий могут быть выполнены. Поэтому для выявления повреждённого генератора целесообразно использовать логический признак, заключающийся в том, что независимо от вида замыкания и параметров генераторов блока, амплитуды низкочастотных гармоник, выделяемые в дифференциальной цепи повреждённого генератора, всегда больше, чем у неповреждённого. Для реализации такого варианта выполнения защиты требуется обмен информацией между комплектами защиты генераторов блока.

В укрупнённых блоках у которых нейтрали части генераторов изолированы или имеется гальванически связанная внешняя сеть, при изменении состава включенных генераторов могут иметь место большие расстройки компенсации. При этом установлено, что если расстройка компенсации превышает 25 %, то из-за увеличения частоты пробоев в спектрах токов нулевой последовательности будут отсутствовать низкочастотные гармонические составляющие. В связи с этим при изменении состава включенных генераторов в блоке можно рекомендовать изменять ток ДГР для сохранения малых значений расстройки компенсации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, заключаются в следующем:

1. Анализ защит от ОЗЗ в укрупнённых блоках показывает, что требованиям отсутствия зоны нечувствительности и селективности удовлетворяют известные устройства защиты, основанные на наложении на первичные цепи вспомогательного контрольного тока, в частности контрольного тока с частотой 25 Гц. В то же время, для дальнейшего усовершенствования защиты, уточнения характеристик её измерительных органов, требуются дополнительные исследования электрических величин при дуговых перемежающихся замыканиях. Необходимость исследования электрических величин при дуговых перемежающихся замыканиях диктуется также тем, что процессы при таком виде повреждения в схеме укрупнённого блока имеют ряд особенностей, по сравнению с известными процессами в электрических распределительных сетях.

2. Принципиальные схемы укрупнённых блоков на ГЭС делятся на две основные группы: первая – блоки, содержащие генераторы, нейтрали которых заземлены через ДГР и не имеющие внешней сети на генераторном напряжении; вторая – блоки у которых нейтрали части генераторов изолированы или имеется гальванически связанная внешняя сеть. Проведённый анализ токов с частотой 25 Гц при устойчивом замыкании в статорной обмотке одного из ге-

нераторов блоков показал возможность выполнения селективной стопроцентной защиты от данного вида повреждения.

3. В ходе анализа токов нулевой последовательности в блоке при перемежающихся дуговых замыканиях установлено, что на выводах генераторов протекают только токи на стадии горения дуги, то есть токи разряда и дозаряда ёмкостей фаз, а результирующие токи нулевой последовательности со стороны нейтрали обусловлены только процессом стекания избыточных зарядов с ёмкостей фаз обмотки статора генераторов в бестоковую паузу. Особенностью укрупнённого блока, в отличие от электрических сетей, является то, что токи разрядной и дозарядной стадии процесса перемежающегося замыкания сливаются в один многочастотный процесс.

4. Выявлены основные факторы, оказывающие влияние на формирование низкочастотных гармоник, которыми являются коэффициент затухания переходного ёмкостного тока и момент погасания дуги. Изменение пробивного напряжения вносит меньший вклад в изменение амплитуд низкочастотных гармоник, так как в этом случае имеет место эффект самостабилизации амплитуд за счёт одновременного изменения интенсивности переходных процессов и частоты следования пробоев.

5. На основе известных теорий о перенапряжениях в электрических сетях среднего напряжения, сформулированы основные положения для моделирования процессов при дуговых перемежающихся замыканиях на ЭВМ. Разработанная модель даёт расчётные результаты, хорошо согласующиеся с известной картиной переходных процессов, имеющих место в реальных электроустановках.

6. Для выполнения измерительного органа защиты выбраны фильтры, удовлетворяющие требованию отстройки от тока небаланса ФТНП и требованию обеспечения правильной работы защиты при перемежающихся дуговых замыканиях.

7. Сопоставление значений амплитуд низкочастотных гармоник на выходе измерительного органа защиты, выполненной по дифференциальному принципу, показало, что не во всех случаях возможно совмещение условий чувствительности при внутренних замыканиях и отстройки от внешних замыканий. Поэтому целесообразно дополнить защиту органом сравнения амплитуд низкочастотных гармоник на выходе измерительных органов защит повреждённого и неповреждённого генераторов.

Личный вклад автора в опубликованных работах.

В результатах, опубликованных в соавторстве, лично автором выполнено следующее: исследование электрических величин при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях в схеме укрупнённого блока; исследование основных закономерностей формирования низкочастотных гармоник токов нулевой последовательности при дуговых перемежающихся замыканиях; разработка математической модели процессов при дуговом перемежающемся замыкании и её реализация на ЭВМ (выполнено совместно с Пашковским С.Н.); обоснование требований к частотным фильтрам измерительного органа

защиты и их выбор; исследование защиты от ОЗЗ в схеме укрупнённого блока при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях, выполненной по дифференциальному принципу.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Понамарев Е.А. Анализ электрических величин, используемых в защите от замыканий на землю генераторов укрупнённого блока // Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 97–99.
2. Понамарев Е.А., Пашковский С.Н. Моделирование процессов в электрических сетях при перемежающихся дуговых замыканиях. ТПУ, – Томск, 2007. – 20 с. Деп. в ВИНТИ (Всероссийский институт научной и технической информации) № 927 – В2007 от 28.09.2007.
3. Понамарев Е.А. Пашковский С.Н. Механизм формирования частотного спектра токов нулевой последовательности при дуговых замыканиях в компенсированных сетях // Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 82–84.
4. Понамарев Е.А. Пашковский С.Н. Основные факторы, влияющие на амплитудно-частотный спектр тока дугового замыкания в компенсированных сетях // Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 86–88.
5. Вайнштейн Р.А., Пашковский С.Н., Понамарев Е.А., Юдин С.М. Качественные признаки для выявления повреждённого элемента в электроустановках с компенсацией ёмкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. Казань: Изд-во КГЭУ. – 2008. – № 7-8. – С. 138–145.
6. Вайнштейн Р.А., Доронин А.В., Понамарев Е.А., Шестакова В.В. О возможности выполнения защиты от замыканий на землю на основе формирования приращения тока на выходе фильтра нулевой последовательности // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: материалы V Всероссийской конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ» Новосибирск. – 2008. – №1. – С. 98–102.
7. Понамарев Е.А., Пашковский С.Н. О применении программного комплекса Matlab при выполнении задач по усовершенствованию защит от замыканий на землю // Материалы Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Часть 3. – С. 180–182.

8. Вайнштейн Р.А., Понамарев Е.А., Доронин А.В., Наумов А.М. Защита от замыканий на землю обмотки статора генераторов, работающих на общие шины // Энергетик. – 2009. – № 1. – С. 39–40.

9. Понамарев Е.А., Пашковский С.Н. Исследование возможности выполнения защиты, реагирующей на активную составляющую тока при устойчивых и перемежающихся замыканиях в сети с комбинированным заземлением нейтрали // Материалы докладов IV Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения»: Изд-во КГЭУ, 2009. – С. 158–160.