

На правах рукописи

ТЕНТИЕВ РЕНАТ БЕКТУРГАНОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ КОНТРОЛЬНОГО ТОКА
С ЧАСТОТОЙ 25 ГЦ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ
В ОБМОТКЕ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРОВ

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» на кафедре «Электрических станций»

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

Официальные оппоненты: **Манусов Вадим Зиновьевич**
доктор технических наук, профессор

Зиновьев Николай Тимофеевич
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник

Ведущая организация: Кузбасское открытое акционерное общество энергетики и электрификации (ОАО «Кузбассэнерго»), г. Кемерово

Защита состоится «14» октября 2009 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 ТПУ.

Автореферат разослан «10» сентября 2009 г.

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

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

В настоящее время, накоплен довольно большой опыт эксплуатации защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока, основанной на наложении контрольного тока с частотой 25 Гц. Наложение контрольного тока обеспечивает работу защиты при устойчивых замыканиях, а при применении на генераторах также и устранение зоны нечувствительности при замыканиях вблизи нейтрали. При перемежающихся дуговых замыканиях на землю защита работает за счет естественных низкочастотных гармоник, порождаемых дуговым замыканием. Наложение контрольного тока с частотой 25 Гц осуществляется с помощью источника контрольного тока (ИКТ), основным элементом которого является электромагнитный параметрический делитель частоты. Определенные ограничения по габаритам и стоимости элементов ИКТ обуславливают сравнительно небольшое значение создаваемого им контрольного тока. В целом характеристики защиты с такими уровнями токов являются удовлетворительными. Однако бесспорно, что увеличение контрольного тока при прочих равных условиях приведет к повышению надежности защиты. Особенно это важно для мощных гидрогенераторов, работающих параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора. В этом случае наложение контрольного тока кроме устранения зоны нечувствительности позволяет решить задачу селективности по отношению к поврежденному генератору.

В последнее время часто применяется схема блока генератор – трансформатор с питанием сети собственных нужд или местной нагрузки через реактивную отпайку. В такой схеме очень важная функция селективности защиты генератора от замыканий на землю может быть решена также путем наложения контрольного тока. Особенность применения способа наложения контрольного тока в данном случае обусловлена тем, что нейтраль сети изолирована и поэтому наложение контрольного тока может быть осуществлено, например, через типовые трансформаторы напряжения (ТН).

Для этого случая необходимо разработать схему включения делителя частоты и выбрать ее параметры так, чтобы обеспечить максимально возможный контрольный ток.

Актуальность задачи повышения надежности защиты за счет возможного увеличения контрольного тока обусловлена также и тем, что источники контрольного тока используются для выполнения защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, в составе комплексной цифровой защиты НПП «Экра».

Источник контрольного тока, принятый в данной работе как базовый элемент для дальнейшего усовершенствования и сравнительно нового применения для наложения контрольного тока с частотой 25 Гц через трансформаторы напряжения, разработан на основе исследований выполненных сотрудниками кафедры электрических станций Томского политехнического университета.

Наиболее существенный вклад в эту работу внесли Р.А. Вайнштейн, А.В. Шмойлов, Н.В. Коломиец, С.М. Юдин.

При выполнении работы автор также использовал известные результаты исследований в области защиты от замыканий на землю, выполненных И.М. Сиротой, В.М. Кискачи, В.А. Шуиным и др.

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является разработка мероприятий, обеспечивающих повышение надежности работы защиты от замыканий на землю за счет увеличения тока с частотой 25 Гц, отбираемого от источника контрольного тока, выполненного на базе электромагнитного параметрического делителя частоты.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Систематизация условий работы электромагнитного параметрического делителя частоты, как основного элемента источника контрольного тока и сопоставление их с условиями возбуждения колебаний половинной частоты.

2. Разработка схемы и обоснование выбора параметров устройства для наложения контрольного тока через типовые трансформаторы напряжения.

3. Исследование характера изменения электрических величин при замыканиях на землю в схеме блока генератор - трансформатор с реактивной отпайкой при наложении контрольного тока через трансформаторы напряжения.

4. Исследование вариантов возможных изменений конструкции и электрической схемы источника, позволяющих увеличить контрольный ток без увеличения его габаритов и стоимости.

Методы исследования – исследования проводилась с использованием методов расчета линейных и нелинейных электрических цепей и компьютерного моделирования.

Достоверность результатов полученных в диссертационной работе, подтверждается непротиворечивостью полученных результатов с имеющимся опытом практического применения источников контрольного тока для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов.

Научная новизна - показано, что ограничение активной мощности нагрузки электромагнитного параметрического делителя частоты по условию возбуждения колебаний обусловлено нарушением колебательного характера свободного процесса в контуре делителя, а условие по соотношению энергии, вносимой за счет периодического изменения индуктивности и рассеиваемой энергии, выполняется с большим запасом.

Практическое значение работы.

1. Увеличение контрольного тока за счет предложенной в работе замены трансформаторной связи выходной и контурной обмоток делителя частоты на автотрансформаторную и разработка рекомендаций по выбору параметров схемы наложения контрольного тока через трансформаторы напряжения, обеспечивающие получение максимально возможного тока, позволяют повысить надежность защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов.

2. Проработаны конкретные предложения по усовершенствованию защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на двух электростанциях республики Кыргызстан.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследований и разработки источника контрольного тока, включаемого через трансформаторы напряжения, использованы при конструировании и изготовлении источников для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, в составе комплексной цифровой защиты НПП «Экра».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщение условий работы параметрического делителя частоты в составе источника контрольного тока, позволивших определить пути для увеличения контрольного тока без изменения габаритов и стоимости источника контрольного тока.

2. Способ увеличения контрольного тока отбираемого от делителя частоты в сети с компенсацией емкостного тока путем замены трансформаторной связи между выходной и контурной обмотками на автотрансформаторную.

3. Обоснование выбора параметров элементов источника контрольного тока, вводимого через трансформаторы напряжения, при которых совмещаются условия получения максимально возможного контрольного тока при приемлемой мощности электромагнитного параметрического делителя частоты.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих мероприятиях:

- Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2007, 2008 гг.);
- XII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2006 г)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ и 3 депонированных статьи.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 57 наименований и 77 рисунков. Общий объем диссертации 159 стр.: текст диссертации 151 стр., список литературы 8 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 условия работы электромагнитного параметрического делителя частоты в качестве источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока.

Ограничение значения контрольного тока, который может быть получен от источника контрольного тока, обусловлено нарушением тех или иных условий возбуждения колебаний половинной частоты. Поэтому есть необходимость сопоставления условий работы делителя в качестве источника контрольного тока с условиями возбуждения колебаний.

Причинами нарушения условий возбуждения колебаний половинной частоты при использовании ИКТ в электроустановках с компенсацией емкостного могут быть - перегрузка по активной или реактивной мощности на половинной частоте или нарушение электромагнитного режима из-за протекания по выходной обмотке тока дугогасящего реактора.

В связи с этим определен характер нагрузки делителя частоты и мощность нагрузки в нормальном режиме и при замыкании на землю в зависимости от переходного сопротивления в месте замыкания, расстройки компенсации и абсолютного значения тока дугогасящих реакторов

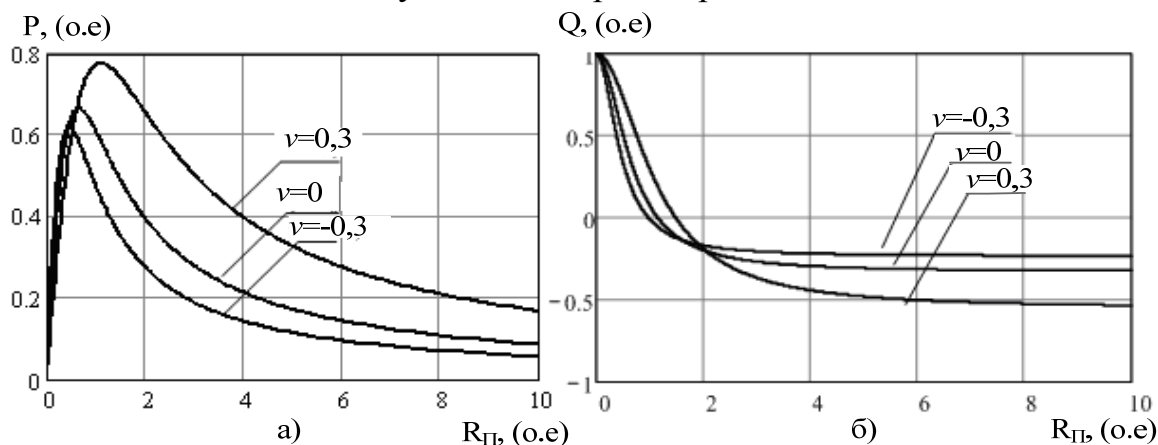


Рис. 1. График зависимостей значения мощности активной (а) и реактивной (б) нагрузки делителя частоты в зависимости от переходного сопротивления в месте замыкания, отнесенного к емкостному сопротивлению сети относительно земли на промышленной частоте

Значения мощности активной и реактивной нагрузки делителя частоты в зависимости от переходного сопротивления в месте замыкания, представленные на рис. 1, отнесены к реактивной мощности при металлическом замыкании, когда делитель частоты нагружен на эквивалентное сопротивление дугогасящих реакторов.

Мерой влияния тока ДГР на электромагнитный режим является намагничивающая сила $F = I_{ДГР} W_{ВЫХ}$, где $W_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}$ - число витков выходной обмотки. Для конкретного делителя она не должна превышать предельное значение намагничивающей силы ($F_{ПРЕД}$), при которой еще не нарушается процесс деления частоты. При этом максимальный контрольный ток, который может быть получен

$$I_{ПРЕД} = \frac{2\sqrt{3}U_{УД}F_{ПРЕД}}{U_{НОМ}},$$

где $U_{УД}$ - напряжение с частотой 25 Гц, наводимое на одном витке выходной обмотки, $U_{НОМ}$ - номинальное напряжение электроустановки, где применяется защита.

Как видно, для конкретного исполнения ИКТ предельный контрольный ток, из условия сохранения режима деления частоты при протекании по выходной обмотке тока ДГР, не зависит от значения тока дугогасящих реакторов, а, следовательно, и от емкостного тока сети, и при прочих равных условиях обратно пропорционален номинальному напряжению электроустановки

Однако, при $I_{25} = I_{ПРЕД}$ от значения тока дугогасящих реакторов зависит реактивная мощность, которую должен обеспечить ИКТ при металлическом замыкании

$$Q = I_{25ПРЕД}^2 \omega L_{ДГР} = I_{25ПРЕД}^2 \frac{U_{НОМ}}{2\sqrt{3}I_{ДГР}}. \quad (1)$$

Наибольшее значение реактивной мощности по (1) получается при малых токах $I_{ДГР} \approx 5 \div 10$ А, что может иметь место при выполнении защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов. Это наибольшее значение реактивной мощности составляет не более 10 % от мощности колебательного контура практически используемых источников контрольного тока.

Реактивная нагрузка индуктивного или емкостного характера эквивалентна изменению емкости колебательного контура, а, следовательно, изменению частоты собственных колебаний, что является одним из факторов, влияющих на условие возбуждения колебаний половинной частоты. Относительное изменение емкости равно относительному значению реактивной нагрузки. Так как собственная частота при прочих равных условиях обратно пропорциональна корню квадратному емкости колебательного контура, то дополнительная реактивная нагрузка в 10% приводит к изменению собственной частоты примерно на 5%.

Таким образом, основным условием определяющим максимально возможный контрольный ток в сети с компенсацией емкостного тока, является нарушение электромагнитного режима из-за протекания тока дугогасящего реактора по выходным обмоткам делителя частоты.

Далее проанализированы условия возбуждения колебаний для параметрического делителя частоты, имеющего схему, которая показана на рис. 2.

Поскольку в колебательном контуре делителя частоты отсутствует источник половинной частоты, то очевидно, что колебания половинной частоты могут возникнуть и существовать только в том случае, если собственная частота колебательного контура будет равна половине частоты источника питания.

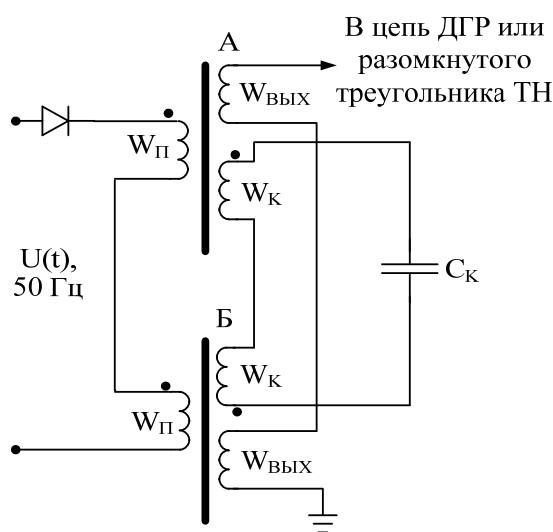


Рис. 2. Схема электромагнитного параметрического делителя частоты

Поскольку индуктивность колебательного контура делителя частоты периодически меняется под действием тока, протекающего в цепи возбуждения, то точнее говорить о равенстве средней собственной частоты половине частоты источника питания.

Вторым обязательным граничным условием возникновения и существования колебаний половинной частоты является равенство энергии вносимой за счет периодического изменения индуктивности и энергии рассеиваемой в колебательном контуре.

Выражение для мгновенной резонансной частоты можно получить через выражение магнитной проницаемости, которая при аппроксимации характеристики намагничивания гиперболическим синусом $h = \alpha sh\beta b$ может быть записана в следующем виде

$$\mu = \frac{db}{dh} = \frac{1}{\frac{dh}{db}} = \frac{1}{\alpha\beta ch\beta b},$$

где h и b - мгновенные значения напряженности и индукции магнитного поля; α, β - коэффициенты, имеющие соответственно размерности A/m и l/Tl .

Мгновенная индуктивность обмоток колебательного контура и коэффициент затухания при введении безразмерного времени $\tau = \omega t$ равны

$$L = 2 \frac{W_K^2 S}{l_{CP}} \frac{1}{\alpha\beta ch\beta b}, \quad \delta = \frac{R}{2L},$$

где W_K и R - число витков и сопротивление колебательного контура, S и l_{CP} площадь поперечного сечения и длина средней магнитной линии магнитопроводов.

Собственная мгновенная частота колебательного контура будет равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_K} - \delta^2},$$

где C_K - емкость конденсатора колебательного контура.

Для обеспечения изменения индуктивности с частотой 2ω мгновенное значение индукции должно изменяться по закону

$$\beta b = \beta B_1 \sin 2\omega t + \beta B_0,$$

где βB_1 - амплитуда индукции двойной частоты, βB_0 - постоянная составляющая индукции.

Мгновенная собственная частота колебательного контура, отнесенная к половинной частоте источника питания ω

$$\omega_{0*} = \sqrt{\frac{1}{K} ch\beta b \left(1 - \frac{R_*^2}{4} \frac{1}{K} ch\beta b \right)},$$

где $R_* = R\omega C_K$ - сопротивление в относительных единицах, $K = \frac{2SW_K^2\omega^2 C_K}{\alpha\beta l_{CP}}$ -

обобщенный конструктивный коэффициент.

Критерием границы возбуждения колебаний половинной частоты, как указывалось, является равенство средней за период свободной частоты половинной частоте. При принятых относительных единицах это условие имеет вид

$$\omega_{cp0*} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega_{0*} d\tau = 1.$$

При значении индукции, соответствующем выполнению условия по равенству свободной частоты половинной частоте должно выполняться и энергетическое условие. Для энергии вносимой в колебательный контур за счет периодического изменения индуктивности и рассеиваемой в активном сопротивлении получены соответствующие выражения в относительных единицах

$$P_{LCP*} = K \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{ch\beta b} \cos(\tau + \varphi) + \frac{d \frac{1}{ch\beta b}}{d\tau} \sin(\tau + \varphi) \right] \sin(\tau + \varphi) d\tau,$$

$$P_{RCP*} = \frac{R_*}{2}.$$

При индукции, соответствующей выполнению резонансного условия, энергетическое условие выполняется с большим запасом (рис. 3).

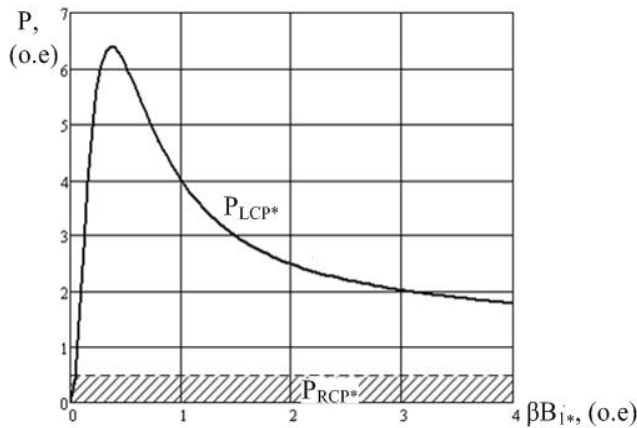


Рис. 3. Зависимости вносимой и рассеиваемой энергии от амплитуды индукции двойной частоты

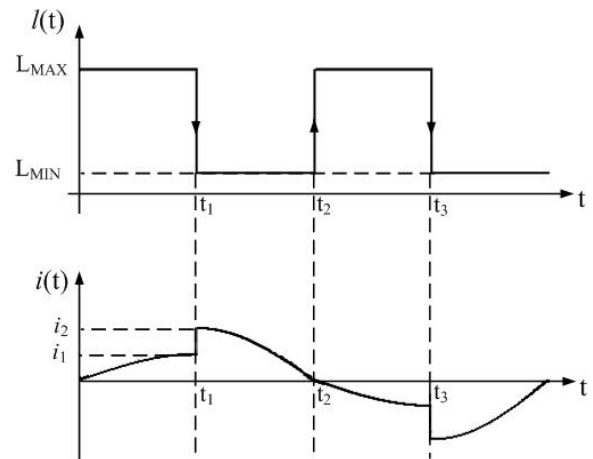


Рис. 4. Пояснение к процессу передачи энергии в колебательный контур за счет изменения индуктивности

Однако опыт показывает, что нарушение колебаний половинной частоты происходит при меньших значениях теряемой энергии. Это может происходить из-за того, что при некоторых значениях мгновенной индуктивности и активной нагрузки характер переходного процесса в контуре становится не колебательным.

Из приведенной стилизованной диаграммы (рис. 4), на которой иллюстрируется процесс параметрического возбуждения следует, что колебательный характер переходного процесса должен сохраняться при всех мгновенных значениях индуктивности. Предельное значение относительного активного сопротивления полученного из этого условия при различных значениях K лежит в

пределах $0,4 \div 0,6$. Относительное активное сопротивление колебательного контура равно отношению рассеиваемой мощности к реактивной мощности конденсатора при работе делителя частоты. Как показано выше максимально возможное значение этого отношения при использовании делителя частоты в качестве ИКТ составляет около 8%. Следовательно, условие сохранения колебательного процесса в контуре делителя также выполняется с запасом.

Таким образом, в реальном диапазоне емкостных токов замыкания на землю, причиной ограничения контрольного тока является влияние намагничивающей силы, создаваемой током дугогасящего реактора.

Вторая глава посвящена разработке рекомендаций по выбору параметров устройства для наложения контрольного тока с частотой 25 Гц через типовый трансформатор напряжения для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов (рис. 5) в схеме блока генератор – трансформатор с питанием сети собственных нужд и местной нагрузки через реактированную отпайку. В этом случае нейтраль изолирована, поэтому наложение контрольного тока осуществляется через обмотку типового трансформатора напряжения, соединенную в разомкнутый треугольник. При этом должен быть решен вопрос обеспечения максимально возможного контрольного тока.

Кроме ограничений по условию возбуждения, о которых было сказано выше, в данном случае должно быть учтено ограничение по максимально допустимому току в обмотках ТН.

При замыкании на землю действующее значение тока в обмотках трансформатора напряжения определяется составляющими с частотой 25 Гц и 50 Гц. В таких условиях делитель частоты должен подключаться через фильтр присоединения (Ф.П.), частотная характеристика и параметры которого должны быть такими, чтобы при замыкании в достаточной степени ограничивался ток с частотой 50 Гц, а сопротивление к току с частотой 25 Гц было бы по возможности минимальным. Результирующее действующее значение тока в обмотках трансформатора напряжения при этом не должно превышать допустимого значения.

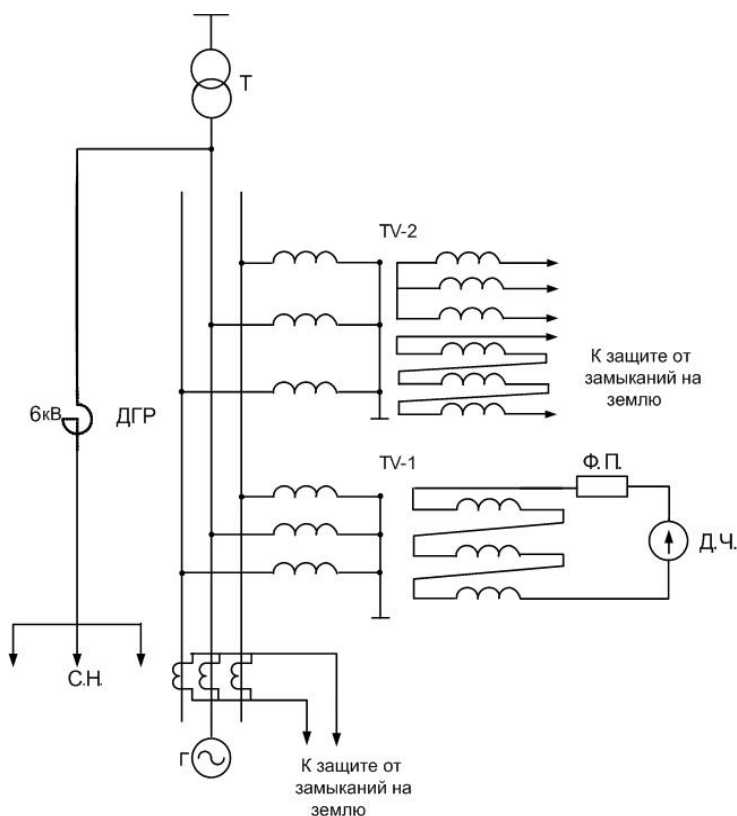


Рис. 5. Схема наложения контрольного тока через трансформатор напряжения для выполнения защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего в блоке с трансформатором при наличии реактированной отпайки

Таким условиям может в принципе удовлетворять фильтр из последовательно соединенных линейного дросселя и конденсатора, настроенных в резонанс на частоте 25 Гц. При этом делитель частоты будет работать на чисто активную нагрузку, которая не должна превышать допустимую по условию возбуждения колебаний.

Получены соотношения для схемы разрабатываемого устройства, с помощью которых определены необходимые количественные параметры для конструирования.

Зависимости токов с частотой 25 и 50 Гц и активной мощности, требующейся от делителя частоты в зависимости от реактивного сопротивление дросселя фильтра присоединения (рис. 6) позволили выбрать реактивное сопротивление дросселя и его добротность, при которых совмещаются условия получения максимально возможного контрольного тока при допустимой активной нагрузке на делитель частоты.

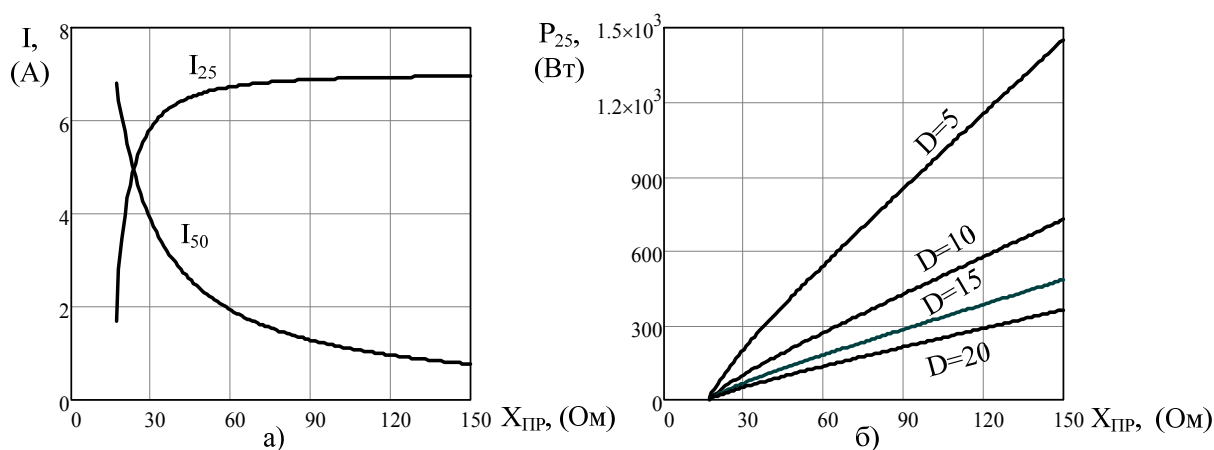


Рис. 6. Графики зависимости токов с частотой 25 Гц и 50 Гц (а) и активной мощности (б) от индуктивного сопротивления цепи наложения при различных значениях добротности фильтра

Приведенные зависимости получены для электроустановки с номинальным напряжением 6 кВ и включением делителя частоты через соединенные в разомкнутый треугольник основные вторичные обмотки трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ.09-6.

Как видно при снижении индуктивного сопротивление дросселя фильтра активная мощность делителя частоты снижается. Однако это сопротивление нельзя принимать ниже такого значения, при котором имеет место резкое снижение тока с частотой 25 Гц. В данном случае для выполнения устройства принято сопротивление, равное 40 Ом.

В этом же разделе исследованы электрические величины с частотой 25 Гц при замыканиях, в схеме блока генератор – трансформатор с питанием сети собственных нужд через реактированную отпайку.

В нормальном режиме ток с частотой 25 Гц в цепи защищаемого генератора мал, так как емкость обмотки статора относительно земли значительно меньше, чем емкость присоединенной сети. При замыкании на землю в цепи генератора ток увеличивается, а напряжение нулевой последовательности с

частотой 25 Гц снижается. Поэтому одним из возможных вариантов выполнения защиты может быть использование снижения отношения напряжение к току.

В третьей главе в соответствии с выводами, полученными в главе 1, основным фактором, который ограничивает максимально возможное значение контрольного тока при использовании источника в сетях с компенсацией емкостного тока, является влияние намагничивающей силы от тока дугогасящих реакторов, протекающего по выходной обмотке.

В применяемых в настоящее время источниках контрольного тока основным мероприятием для снижения этого влияния является замена конденсатора колебательного контура цепью из последовательно соединенных дросселя и конденсатора, настроенных в резонанс на частоте 50 Гц.

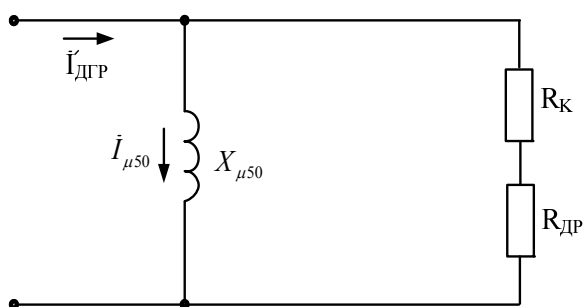


Рис. 8. Схема замещения делителя частоты относительно зажимов выходной обмотки при выполнении условий резонанса на частоте 50 Гц в цепи колебательного контура

намагничивания делителя на частоте 50 Гц ($X_{\mu 50}$) и суммарного активного сопротивления цепи колебательного контура ($R_{KЭКВ}$). Схема замещения при выполнении условий точной настройки в резонанс указанной цепи приведена на рис. 8.

На электромагнитные процессы в делителе частоты оказывает влияние только намагничивающая часть тока $I_{\mu 50}$, которая, будучи приведенной к числу витков обмотки колебательного контура равна:

$$I_{\mu 50} = I_{ДГР} \frac{W_{ВЫХ} R_{KЭКВ}}{W_K \sqrt{R_{KЭКВ}^2 + X_{\mu 50}^2}}.$$

Практически степень влияния тока дугогасящих реакторов при изготовлении и наладке определяется измерением напряжения на ветви намагничивания с помощью специальной измерительной обмотки с числом витков $W_{И}$.

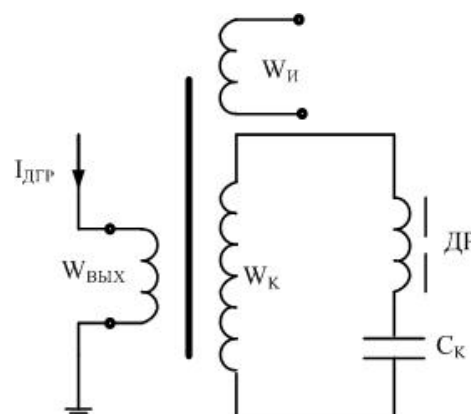


Рис. 7. Схема делителя частоты относительно зажимов выходной обмотки

Для рассмотрения влияния тока дугогасящих реакторов на процессы в делителе частоты представим связанные электромагнитно выходную и контурную обмотки в виде эквивалентного трансформатора (рис. 7).

При точной настройке конденсатора и дросселя в цепи колебательного контура в резонанс на частоте 50 Гц степень влияния тока дугогасящего реактора на электромагнитные процессы в делителе частоты зависит от соотношения сопротивления ветви намагничивания

Напряжение с частотой 50 Гц на ветви намагничивания, приведенное к числу витков измерительной обмотки равно:

$$U_{\mu 50} = I_{ДГР} \frac{W_{ВЫХ} W_{И} X_{\mu 50} R_{КЭКВ}}{W_{К}^2 \sqrt{R_{КЭКВ}^2 + X_{\mu 50}^2}}.$$

Максимально допустимой намагничивающей силе ($F_{ДОП} = W_{ВЫХ} I_{ДГР}$) соответствует определенное напряжение на измерительной обмотке ($U_{ДОП}$). При этом максимально допустимое активное сопротивление цепи колебательного контура с учетом того, что практически $R_{КЭКВ} \ll X_{\mu 50}$ равно

$$R_{ДОП} = \frac{2\sqrt{3}U_{УД}U_{ДОП}W_{К}^2}{I_{25}U_{НОМ}W_{И}}. (2)$$

Из (2) также следует, что контрольный ток I_{25} может быть увеличен во столько же раз, во сколько раз возможно будет снизить активное сопротивление цепи колебательного контура.

Активное сопротивление цепи колебательного контура складывается из активного сопротивления дросселя и собственного сопротивления обмотки колебательного контура.

Минимально возможное сопротивление

контурной обмотки определяется площадью окна магнитопровода, где эта обмотка может быть размещена и коэффициентом заполнения окна медью. С увеличением числа витков выходной обмотки пропорционально увеличивается контрольный ток. При этом максимально допустимое сопротивление снижается, а фактическое сопротивление увеличивается из-за того, что доля площади окна магнитопровода, занимаемая выходной обмоткой, увеличивается, а доля площади для контурной обмотки уменьшается. Равенство максимально допустимого и фактического сопротивлений цепи колебательного контура определяет максимально возможный контрольный ток для конкретного ИКТ. Это иллюстрируется на рис. 9 (кривая 2).

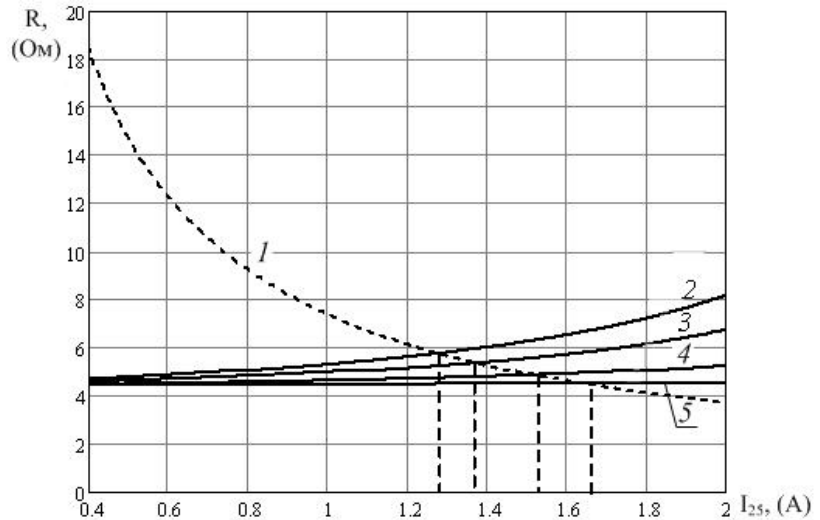


Рис. 9. Иллюстрация возможности увеличения максимального контрольного тока за счет применения автотрансформаторной связи между обмоткой колебательного контура и выходной обмоткой:

- 1 - максимально допустимое сопротивление ($R_{ДОП}$);
- 2 - фактическое сопротивление ($R_{К}+R_{ДР}$) при трансформаторной связи;
- 3, 4, 5 - фактическое сопротивление ($R_{К.ЭКВ}$) при автотрансформаторной связи при токах I_{25} соответственно 50, 20 и 10 А.

Для возможного увеличения контрольного тока предлагается замена трансформаторной связи между выходной и контурной обмотками на автотрансформаторную рис. 10.

При этом за счет замещения части витков обмотки колебательного контура выходной обмоткой, оставшаяся часть витков $W_{КА} = W_K - W_{ВЫХ}$ может быть выполнена проводом с большей площадью поперечного сечения, которое определяется соотношением

$$S_{ПРКА} = \frac{S_{ОКА} K_{3.К}}{W_{КА}} = \frac{\left(S_O - \frac{I_{25} U_{НОМ}}{2\sqrt{3} U_{УД} K_{3.В} \Delta_B} \right) K_{3.К}}{\sqrt{\frac{\alpha \beta l_{СР} K}{2 C_K q \omega^2} - \frac{I_{25} U_{НОМ}}{2\sqrt{3} U_{УД} I_{ДГР}}}},$$

где S_O - площадь окна магнитопровода, занимаемая выходной и контурной обмотками,

Δ_B - плотность тока выходной обмотки,

$K_{3.В}$ и $K_{3.К}$ - соответственно коэффициенты заполнения медью для выходной и контурной обмоток.

Особенностью предлагаемого мероприятия является зависимость возможного увеличения площади поперечного сечения провода контурной обмотки, а следовательно и снижения сопротивления от тока дугогасящих реакторов.

Зависимости сопротивления цепи колебательного контура от контрольного тока при разных токах дугогасящих реакторов при автотрансформаторной связи нанесены на рис. 9 (кривые 3,4 и 5).

Как видно, эффективность перехода на автотрансформаторную связь обмоток тем выше, чем меньше ток дугогасящих реакторов. Это важно, так как позволяет увеличить контрольный ток в одном из ответственных случаев, а именно при выполнении защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов.

Четвёртая глава посвящена разработке предложений по усовершенствованию защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в энергосистеме республики Кыргызстан.

В составе энергосистемы Кыргызстана эксплуатируется большое количество синхронных генераторов, схемы присоединения которых отличаются большим многообразием. Значительную часть всех электростанций составляют гидроэлектростанции с генераторами различной мощности.

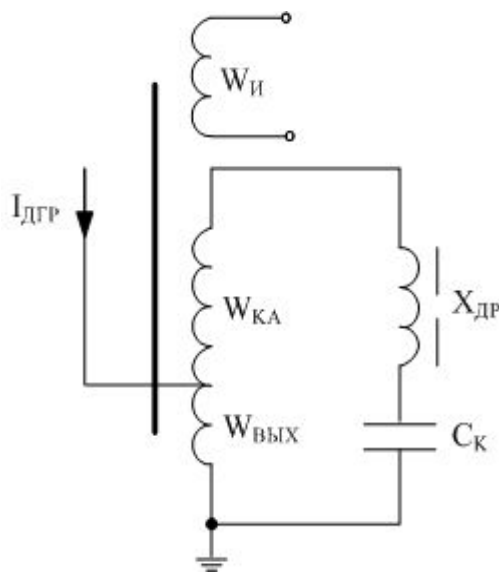


Рис. 10. Схемы делителя частоты при автотрансформаторном соединении выходной и контурной обмоток

В большинстве случаев гидрогенераторы на электростанциях включены по схеме блока генератор – трансформатор. Основная защита от замыканий на землю в обмотке статора выполняется с использованием напряжения нулевой последовательности промышленной частоты. Для устранения зоны нечувствительности используется защита, основанная на принципе сравнения составляющих с частотой 150 Гц в напряжении нулевой последовательности на выводах генератора и в нейтрали.

Анализ состояния выполнения защиты от однофазных замыканий в обмотке статора генераторов показал, что есть объекты, в которых защита не удовлетворяет всем требованиям.

Использование результатов данной работы для усовершенствования защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов может быть прежде всего полезным в тех случаях, когда существующая защита не обеспечивает селективности по отношению к поврежденному генератору.

Одним из таких объектов является блок Учкурганской ГЭС, в котором гидрогенераторы присоединены к трансформатору по схеме, приведенной на рис. 11. На блоке Учкурганской ГЭС используется не-селективная защита, реагирующая на появление напряжения нулевой последовательности промышленной частоты. Поскольку в цепи каждого генератора имеется выключатель, то целесообразно применить селективную защиту от замыканий на землю.

Для выполнения защиты с наложением контрольного тока с частотой 25 Гц, в цепь дугогасящего реактора генератора Г1 должен быть включен источник контрольного тока.

С учетом предложения о замене трансформаторной связи между обмотками на автотрансформаторную и соответствующих теоретических обоснований, приведенных в этой работе, контрольный ток при токе дугогасящего реактора, равном примерно 10 А, может быть установлен равным 1,64 А.

Для выполнения защиты необходимо контролировать изменение токов с частотой 25 Гц на выводах генераторов, ток со стороны нейтрали гидрогенера-

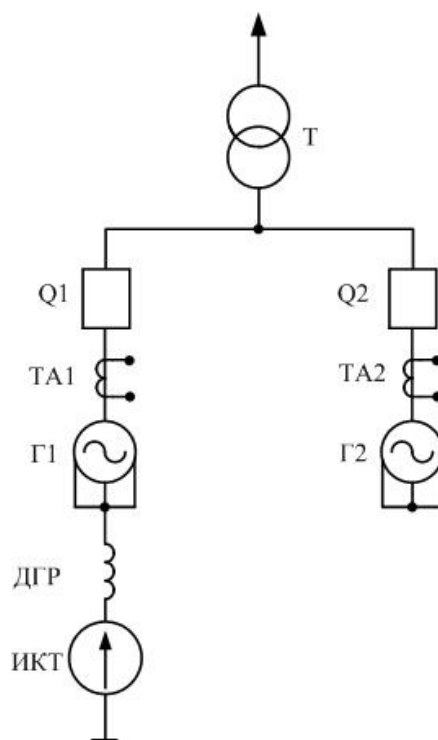


Рис. 11. Схема укрупненного блока Учкурганской ГЭС

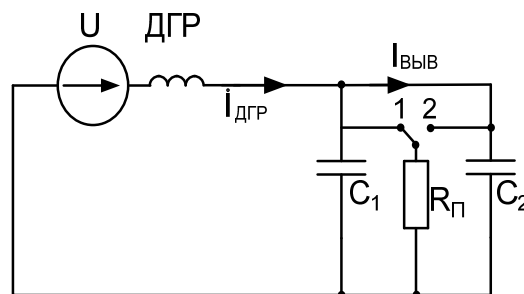


Рис. 12. Схема замещения для расчета электрических величин при замыкании на землю в обмотке статора генераторов Учкурганской ГЭС

тора Г1 и напряжение на вторичной обмотке дугогасящего реактора. Поэтому проведены расчеты изменения токов и напряжений с частотой 25 Гц при замыкании через переходное сопротивление для определения требований к измерительным органам защиты. Для проведения расчетов электрических величин при замыкании на землю в обмотке статора генераторов принята схема замещения, приведенная на рис. 12.

Ток в цепи дугогасящего реактора

$$\dot{I}_{ДГР*} = \frac{1 + j\frac{1}{2}R_{П*}}{\frac{1}{2}R_{П*}(3 - 4v) + j}$$

Напряжение на дугогасящем реакторе

$$\dot{U}_{ДГР*} = \frac{j\left(1 + j\frac{1}{2}R_{П*}\right)}{\frac{1}{2}R_{П*}(3 - 4v) + j}$$

Ток на выводах при замыкании в генераторе Г1

$$\dot{I}_{ВЫВ1*} = \dot{I}_{ДГР*} \frac{jR_{П*} \frac{C_2}{C_1 + C_2}}{2 + jR_{П*}}$$

Ток на выводах при замыкании в генераторе Г2

$$\dot{I}_{ВЫВ2*} = \dot{I}_{ДГР*} \frac{2 + jR_{П*} \frac{C_2}{C_1 + C_2}}{2 + jR_{П*}}$$

В приведенных выше формулах C_1 и C_2 - емкости трех фаз генераторов Г1 и Г2 относительно земли. Токи отнесены к току $I_{ДГР}$ при $R_{П*} = 0$, а напряжение к напряжению ИКТ.

Особенностью схемы блока Учкурганской ГЭС является, то что через ДГР заземлена нейтраль только одного генератора. Поэтому токовый измерительный орган генератора Г1 включается по дифференциальной схеме, чтобы защита не срабатывала при внешних замыканиях (рис.13), а измерительный орган генератора Г2 только на ток выводов генератора. Характер изменения электрических величин при замыкании и направлении токов позволяют предложить следующие варианты формирования признаков для выявления поврежденного генератора. Для генератора Г1 разность токов в цепи дугогасящего реактора и на выводах, а для генератора Г2 ток на выводах

$$\dot{I}_{ЗАЩ1*} = \dot{I}_{ДГР*} - \dot{I}_{ВЫВ1*},$$

$$\dot{I}_{ЗАЩ2*} = \dot{I}_{ВЫВ2*}$$

Расчеты показывают, что целесообразно использовать для выявления поврежденного генератора качественный признак, который заключается в том,

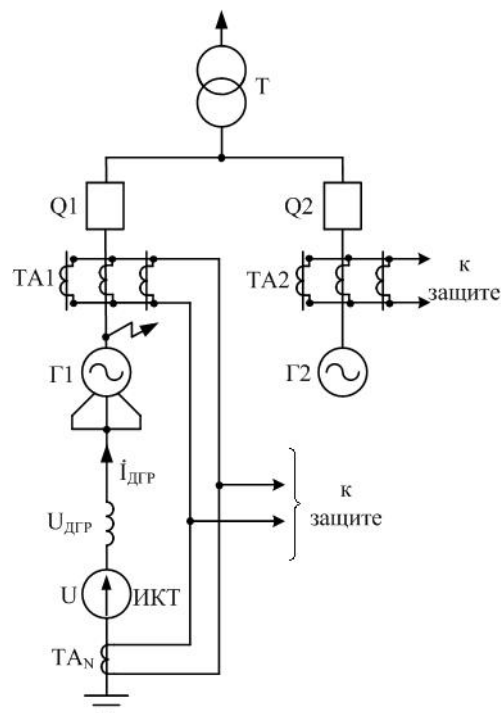


Рис. 13. Направления токов с частотой 25 Гц при металлическом замыкании

что измеряемый ток с частотой 25 Гц в поврежденном генераторе, больше чем в неповрежденном. При $R_{D*} \leq 2$ эти токи отличаются более чем в два раза.

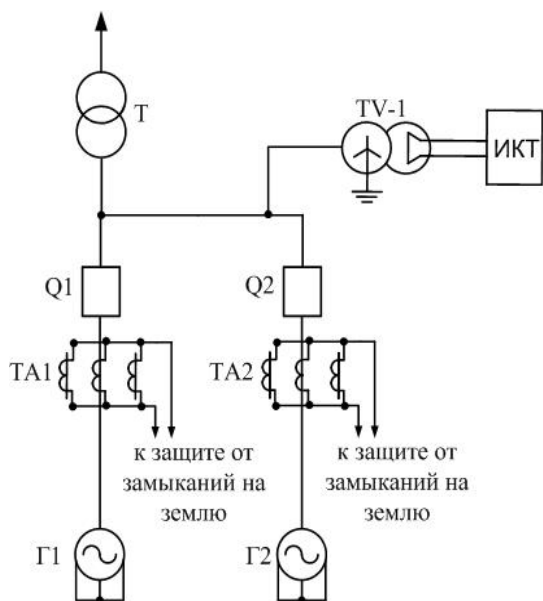


Рис. 14. Схема укрупненного блока Шамалдысайской ГЭС

бирательной защиты от замыканий на землю может быть применено наложение контрольного тока через обмотки трансформатора напряжения, соединенные в разомкнутый треугольник.

Используя результаты, полученные в главе 2, были проведены расчеты для определения параметров фильтра присоединения и токов на выводах поврежденного и неповрежденного генератора и напряжения нулевой последовательности с частотой 25 Гц.

Определение токов с частотой 25 Гц при устойчивых замыканиях, а также результаты исследований при перемежающихся дуговых замыканиях, проведенные в работе, позволяют и в этом случае использовать качественный признак по соотношению токов на выводах генераторов.

Логическая связь релейных измерительных органов защиты приведена на рис. 15. Блок 1 выявляет поврежденный генератор по со-

В качестве пусковых признаков используется увеличение модуля и изменение фазы напряжения на дугогасящем реакторе и появление напряжения нулевой последовательности промышленной частоты.

Другим объектом в энергосистеме Кыргызстана, где целесообразно применение наложенного тока для выполнения селективной защиты является Шамалдысайская ГЭС. В составе Шамалдысайской ГЭС имеется укрупненный блок, в котором два генератора подключены к одной обмотке низкого напряжения трансформатора через отдельные выключатели (рис.14). Так как нейтраль гидрогенераторов изолирована, то для выполнения из-

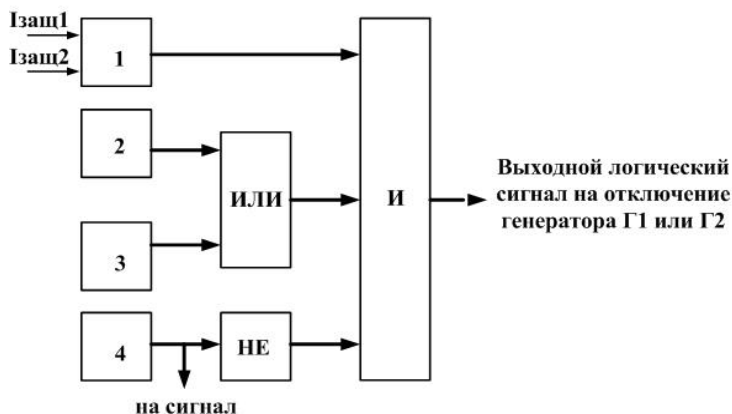


Рис. 15. Логическая связь релейных элементов защиты:

- 1- превышение тока на выводах генератора Г1 над током генератора Г2 (или генератора Г2 над током генератора Г1);
- 2- появление напряжение нулевой последовательности с частотой 50 Гц;
- 3- снижение составляющей с частотой 25 Гц в напряжении нулевой последовательности;
- 4- исчезновение тока с частотой 25 Гц в цепи источника контрольного тока.

отношению токов. Блок 2 выдает логический сигнал при появлении напряжения нулевой последовательности промышленной частоты при замыканиях удаленных от нейтрали. Блок 3 выдает логический сигнал при снижении составляющей с частотой 25 Гц в напряжении нулевой последовательности. При исчезновении тока с частотой 25 Гц в цепи ИКТ защита блокируется и подается сигнал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Проведена систематизация условий работы электромагнитного параметрического делителя частоты на два как основного элемента источника контрольного тока и их сопоставление с условиями возбуждения колебаний половинной частоты.

2. Установлено, что при применении источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока в реальном диапазоне емкостных токов замыкания на землю причиной ограничения контрольного тока, является влияние намагничивающей силы, создаваемой током дугогасящего реактора.

3. Определены параметры элементов источника контрольного тока, включаемого через типовые трансформаторы напряжения, при которых совмещаются условия получения максимально возможного контрольного тока при приемлемой мощности электромагнитного параметрического делителя частоты.

4. На основе исследования изменения электрических величин при замыканиях в сети с изолированной и резистивно заземленной нейтралью с источником контрольного тока, включаемого через трансформатор напряжения, выявлены исходные условия для выполнения селективной защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, имеющих гальваническую связь с сетью или с другими генераторами.

5. Предложен способ увеличения контрольного тока путем замены трансформаторной связи между выходной и контурной обмотками делителя частоты на автотрансформаторную и показано, что эффект от этого мероприятия тем выше, чем меньше ток дугогасящих реакторов.

6. Разработаны конкретные рекомендации для выполнения избирательной защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов двух укрупненных блоков на гидроэлектростанциях Кыргызстана. Для генераторов с заземлением нейтрали через дугогасящие реакторы может быть использовано предложение по увеличению контрольного тока за счет перехода на автотрансформаторную связь между обмотками делителя частоты. Для генераторов с изолированной нейтралью проработан вариант наложения контрольного тока через трансформатор напряжения.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Тентиев Р.Б Сравнительная оценка критериев, определяющих границу возбуждения колебаний в электромагнитном параметрическом делителе частоты на два. // XII Всероссийском научно-техническом конференции Энергетика: экология, надежность, безопасность г Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – С.77-80.
2. Тентиев Р.Б. Определение расчетных условий возбуждения колебаний в ферромагнитном делителе частоты на два XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. - С. 121-123
3. Тентиев Р.Б. Определение основных параметров устройства для наложения контрольного тока с частотой 25 Гц на первичные цепи электроустановки.// Известия Кыргызского государственного технического университета. г. Бишкек - 2007. - №12. – С. 122 – 116.
4. Тентиев Р.Б. Условия работы электромагнитного параметрического делителя частоты в качестве источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю. ТПУ, - Томск, 2008 г. - 13 с. Деп. в ВИНТИ (Всероссийский институт научной и технической информации) 28.09. 2007, № 928 – В2008.
5. Тентиев Р.Б., Юдин С.М. Устройство для наложения тока с частотой 25 Гц через типовой трансформатор напряжения для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов. ТПУ, - Томск, 2008. - 20 с. Деп. в ВИНТИ (Всероссийский институт научной и технической информации) 25.03.2008, №246 – В2008.
6. Вайнштейн Р.А., Тентиев Р.Б., Юдин С.М. Повышение эффективности использования делителя частоты как источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю. ТПУ, - Томск, 2008 г. - 18 с. Деп. в ВИНТИ (Всероссийский институт научной и технической информации) 25.03.2008, №247 – В2008.
7. Тентиев Р.Б. Защита от замыканий на землю с наложением тока с частотой 25 Гц через типовой трансформатор напряжения в сети изолированной нейтралью. // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - С. 107-109.
8. Тентиев Р.Б. Усовершенствование источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю за счет изменения схем соединения обмоток. // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - С. 109-111.
9. Вайнштейн Р.А. Тентиев Р.Б. Юдин С.М. Повышение надежности защиты генераторов от замыканий на землю, основанной на наложении вспомогательного тока с частотой 25 Гц. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. - № 4.-Том 312, С. 96 – 100.

Подписано к печати 1 сентября 2009 г. Формат 60x84/16.
Бумага ксероксная. Печать RISO. Усл. печ. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ № 21.
Отпечатано в типографии
г. Томск, ул. Усова, 7, оф. 040