

На правах рукописи

ПАШКОВСКИЙ Сергей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ
ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
С КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ**

Специальность 05.14.02 – электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Вайнштейн Роберт Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

кандидат технических наук, доцент
Виштибеев Алексей Владимирович

Ведущая организация: промышленное научное предприятие
ООО «ПНП БОЛИД», г. Новосибирск

Защита состоится 13 мая 2010 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 Новосибирского государственного технического университета по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 7 » апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимофеев И.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время подавляющее большинство распределительных электрических кабельных сетей 6-10 кВ городов и промышленных предприятий России имеют большие емкостные токи замыкания на землю и поэтому работают в режиме компенсации емкостного тока. Опыт эксплуатации таких сетей, обобщенный в ряде работ, показывает, что выполнение селективной защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией емкостного тока сопряжено с рядом принципиальных затруднений.

В настоящее время предложен и применяется новый режим заземления нейтрали – комбинированное заземление нейтрали, заключающийся в том, что параллельно дугогасящему реактору подключается резистор, создающий дополнительную активную составляющую тока, равную 10-20 % от суммарного емкостного тока однофазного замыкания сети. При этом имеет место эффект снижения перенапряжений возможных при отклонении настройки компенсации емкостного тока от резонансной.

Целесообразность применения того или иного режима заземления нейтрали определяется рядом факторов, среди которых важным является возможность выполнения селективной защиты от замыканий на землю. Принципиальная возможность выполнения защиты с использованием повышенной активной составляющей при устойчивых замыканиях не вызывает сомнений. Однако работоспособность такой защиты при дуговых перемежающихся замыканиях не очевидна.

В связи с этим, актуальным является проведение исследований электрических процессов при дуговых перемежающихся замыканиях в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с целью выявления возможных признаков для выполнения селективной защиты.

Актуальность задачи усовершенствования защиты от замыканий на землю определяется также тем, что, как показали известные исследования последних лет, повышенный износ изоляционной системы распределительных кабельных сетей вызывается не только кратностью перенапряжений, но и особенно длительностью их воздействия. Это обстоятельство особенно важно, когда в одной сети эксплуатируются кабели с бумажно-масляной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена. В связи с этим, выполнение защиты от замыканий на землю с действием не на сигнал, как принято в настоящее время, а на отключение, если это допустимо по условию потребителей, может стать реальным резервом повышения надежности распределительных кабельных сетей.

При переводе защиты от замыканий на землю с действием на отключение к ней должны предъявляться более высокие требования в части чувствительности и селективности. С учетом того, что защита от замыканий на землю является массовым устройством, она должна также быть достаточно простой по техническому исполнению и по требованиям к ее эксплуатации.

Эти задачи в определенной степени могут быть решены на базе использования для выполнения защиты повышенной активной составляющей и проведения исследований электрических процессов, направленных на обеспечение

правильной работы такой защиты как при устойчивых, так и при перемежающихся замыканиях на землю.

При выполнении работы автор использовал известные результаты исследований в области режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, выполненных Ф.А. Лихачевым, К.П. Кадомской, Г.А. Евдокуниным, Л.И. Сариним, Ю.В. Целебровским, И.М. Сиротой, В.А. Шуиным, А.И. Левиушем, В.Г. Алексеевым, В.М. Кискачи, А.И. Шалиным и др.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является выявление признаков, позволяющих выполнить селективную защиту от замыканий на землю в сети с комбинированным заземлением нейтрали, на основе исследования электрических процессов при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Анализ существующих методов и средств выполнения защиты от однофазных замыканий на землю в условиях применения комбинированного заземления нейтрали.

2. Исследование закономерностей изменения электрических величин нулевой последовательности при дуговых перемежающихся замыканиях для целей разработки защиты от замыканий на землю.

3. Разработка математической модели электрических процессов при дуговых перемежающихся замыканиях в электрической сети с комбинированным заземлением нейтрали, включая модели трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности.

4. Разработка алгоритмов выполнения защит от однофазных замыканий на землю, при которых может обеспечиваться правильная работа защиты при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях.

5. Исследование предложенных алгоритмов построения защит для сети с комбинированным заземлением нейтрали с учетом вероятностного характера процессов при дуговом перемежающемся замыкании.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы методы математического моделирования на базе теории электрических цепей, спектрального анализа, теории вероятности и математической статистики с применением возможностей современных компьютерных технологий.

Достоверность результатов. Модели и методы, используемые автором, основаны на элементах теории электрических цепей. Полученные результаты согласуются с известными теориями электрических процессов при дуговых замыканиях и данными, полученными непосредственно при замыканиях в существующих электрических сетях.

Научная новизна. В работе содержатся следующие новые научные результаты:

1. Установлено, что в сетях с компенсацией емкостного тока и сетях с комбинированным заземлением нейтрали при дуговых перемежающихся замыканиях в токе нулевой последовательности поврежденной линии амплитуды гармоник с частотой ниже промышленной больше амплитуд гармоник с частотой выше промышленной, а в неповрежденной линии наоборот.

2. Выявлено, что при переходе к комбинированному заземлению нейтрали при перемежающихся дуговых замыканиях амплитуды низкочастотных гармоник в токе нулевой последовательности неповрежденной линии, при прочих равных условиях снижаются, благодаря более полному стеканию избыточных зарядов за время между двумя соседними пробоями изоляции.

3. Выявлены области частот, в которых совмещаются условия работы защиты, использующей повышенную активную составляющую тока, при устойчивых и перемежающихся замыканиях.

Практическое значение и реализация результатов работы.

Полученные результаты исследования электрических процессов при перемежающихся дуговых замыканиях и предложенные способы обработки величин нулевой последовательности могут быть основой для выполнения защиты от замыканий на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали.

Математическая модель электрической сети среднего напряжения, дополненная моделью дугового перемежающегося замыкания и моделями измерительных трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности, может быть использована для дальнейших исследований, направленных на усовершенствование устройств защиты от замыканий на землю.

Результаты исследований переданы на предприятие «ПНП БОЛИД» для использования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В сетях с компенсацией емкостного тока и в сетях с комбинированным заземлением нейтрали при дуговых перемежающихся замыканиях в токе нулевой последовательности поврежденной линии амплитуды гармоник с частотой ниже промышленной больше амплитуд гармоник с частотой выше промышленной, а в неповрежденной линии наоборот.

2. При перемежающихся дуговых замыканиях переход к комбинированному заземлению нейтрали приводит к снижению амплитуд низкочастотных гармоник в токе нулевой последовательности неповрежденной линии благодаря более полному стеканию избыточных зарядов за время между двумя соседними пробоями изоляции.

3. Возможность выявления поврежденной линии при дуговых перемежающихся замыканиях, основанная на формировании среднего значения произведения мгновенных значений напряжения и тока нулевой последовательности в полосе частот, близкой к промышленной частоте.

4. Возможность выявления поврежденной линии при дуговых перемежающихся замыканиях, основанная на сравнении суммы квадратов амплитуд гармоник с частотами ниже и выше промышленной.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Электрические станции», научно-техническом совете Электротехнического института Томского политехнического университета (г. Томск, 2007, 2008, 2009 гг.); на международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2007 и 2008 г.г.); на пятой всероссийской научно-технической

конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ» (г. Новосибирск, 2008 г.).

Публикации. По направлению диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе: 3 работы в рецензируемых изданиях по перечню ВАК; 1 работа в сборнике научных трудов, 5 работ – материалы всероссийских и международных конференций; 1 работа депонирована в ВИНТИ.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 106 наименований и приложений. Общий объем диссертации – 208 страниц, в том числе: рисунков – 113, таблиц–75.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ существующих методов и устройств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях среднего напряжения в условиях применения комбинированного заземления нейтрали.

При проведении анализа учитывались современные тенденции к изменению стиля эксплуатации кабельных электрических сетей, связанные с возможным переводом защиты от замыканий на землю с действием на отключение. При этом дополнительным фактором, с точки зрения применимости того или иного вида защиты от замыканий на землю, является необходимость обеспечения селективности по отношению к последовательно включенным участкам одного радиального направления за счет установки выдержек времени по ступенчатому принципу.

Устройства защиты от замыканий на землю с использованием высших гармоник в токе нулевой последовательности не всегда применимы в виду возможного их изменения в широких пределах при изменении режима работы потребителей и конфигурации сети. Применение принципа относительного замера высших гармоник на многих подстанциях сети с согласованием защит по выдержкам времени технически затруднительно.

В настоящее время накоплен большой опыт эксплуатации защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией емкостного тока с использованием низкочастотных составляющих тока нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях и наложения контрольного тока с частотой 25 Гц для действия при устойчивых замыканиях. Анализ применимости такой защиты в сети с комбинированным заземлением нейтрали показал, что подключение параллельно дугогасящему реактору резистора, проводимость которого составляет 10-20 % от суммарной емкостной проводимости сети относительно земли, практически не оказывает влияния на электрические величины с частотой 25 Гц при устойчивом замыкании. При дуговых перемежающихся замыканиях при комбинированном заземлении нейтрали увеличивается частота следования пробоев. Это приводит к смещению спектра токов нулевой последовательности в область более высоких частот, что может снизить селективность защиты. Причем влияние дополнительного резистора на частоту пробоев тем больше, чем меньше расстройка компенсации. При расстройке компенсации 10-20 % переход на комбинированное заземление практически не влияет на частоту пробоев. В последующих разделах работы показано, что при комбинированном заземле-

нии нейтрали имеют место факторы, благодаря которым работа защиты, использующей низкочастотные гармоники, улучшается, что в определенной степени нивелирует фактор увеличения частоты пробоев. Недостатком известной защиты на низкочастотных гармониках является необходимость установки в сети специального источника контрольного тока. В ряде случаев это требует изменения первичной схемы присоединения дугогасящего реактора.

Наиболее предпочтительным вариантом выполнения защиты при комбинированном заземлении нейтрали является использование повышенной активной составляющей тока замыкания. В сетях радиальной конфигурации, какковыми являются, как правило, распределительные кабельные сети, некоторое затруднение при реализации защиты на активной составляющей тока могут внести фазовые погрешности трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности. При соответствующем выборе режима их работы влияние угловых погрешностей может быть сведено до допустимого уровня.

На проблему обеспечения правильного функционирования защиты, использующей активную составляющую тока при перемежающихся замыканиях, обращается внимание еще в довольно ранних работах. Тем не менее, во многих работах последнего времени, особенно связанных с предложениями о переводе действия защит от замыканий на землю на отключение, возможность выполнения защиты однозначно связывают с использованием повышенной активной составляющей. Однако, насколько нам известно, в настоящее время нет устойчивых технических решений по такой защите, разработанной с учетом необходимости правильного функционирования, как при устойчивых, так и при дуговых перемежающихся замыканиях.

Вторая глава посвящена исследованию электрических процессов при дуговых перемежающихся замыканиях в электрических сетях с комбинированным заземлением нейтрали с целью выявления признаков, позволяющих выполнить селективную защиту.

Известные нам ранее выполненные работы применительно к сетям с компенсацией емкостного тока, посвящены исследованиям спектров тока нулевой последовательности в полосе частот ниже промышленной. В данной работе спектры токов нулевой последовательности исследованы в более широкой полосе частот, что, во-первых, позволило выявить новые признаки для выполнения селективной защиты по качественным особенностям спектров и, во-вторых, определить область частот при перемежающихся замыканиях, в которой целесообразно выполнять защиту, использующую активную составляющую тока.

При дуговых перемежающихся замыканиях ток нулевой последовательности, измеряемый в защищаемых линиях сети, на стадии горения дуги определяется током разряда емкости поврежденной фазы и током дозаряда емкостей неповрежденных фаз, а после погасания дуги – током стекания накопившихся при горении дуги избыточных зарядов через элементы заземления нейтрали. В исследованиях принято, что процессы разряда емкости поврежденной фазы и дозаряда емкостей неповрежденных фаз описываются дифференциальными уравнениями второго порядка.

Переходный процесс разряда емкости поврежденной фазы определяется параметрами контуров, образованных индуктивностью и активным сопротивлением одной фазы линии сети. Индуктивность этих контуров, особенно в кабельных сетях, мала и поэтому резонансная частота контура разряда составляет от нескольких десятков до нескольких сотен кГц. При такой частоте из-за сильного проявления поверхностного эффекта в проводящих элементах на пути тока замыкания эквивалентное активное сопротивление получается настолько большим, что переходный ток разряда емкости поврежденной фазы имеет апериодический характер (рис. 1).

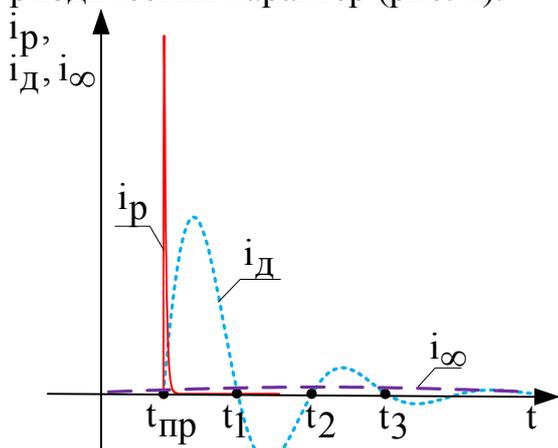


Рис. 1. Качественные кривые мгновенных токов значений переходных токов разряда (i_p), дозаряда (i_d) и принужденного тока (i_∞)

Токи дозаряда емкостей неповрежденных фаз замыкаются через источники питания, например, питающий сеть трансформатор. Индуктивность на пути тока дозаряда может быть значительно больше индуктивности на пути тока разряда. По этой причине резонансная частота контура дозаряда значительно ниже и составляет несколько кГц и процесс может иметь характер затухающих колебаний (рис. 1).

Интенсивность переходных процессов разряда и дозаряда определяется соответственно напряжением на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции ($U_{пр}$) и разностью начального и принужденного напряжений на неповрежденных фазах, которая при анализе принята без учета влияния междофазных емкостей, то есть равной $U_{пр}$. Интенсивность тока стекания определяется начальными условиями в контуре нулевой последовательности в момент погасания дуги. Для дальнейших исследований выражения переходного тока разряда емкости поврежденной фазы и дозаряда емкостей неповрежденных фаз, соответственно, были приняты в следующем виде:

$$i_p = \frac{k_{\Pi} U_{пр} \omega_p^2 C_{\Phi}}{p_1 - p_2} \cdot \left[e^{-p_1(t-t_{пр})} - e^{-p_2(t-t_{пр})} \right], \quad (1)$$

$$i_d = \frac{k_{\Pi} 2U_{пр} \omega_d^2 C_{\Phi}}{\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2}} \cdot e^{-\delta_d(t-t_{пр})} \cdot \sin \left[\left(\sqrt{\omega_d^2 - \delta_d^2} \right) \cdot (t-t_{пр}) \right], \quad (2)$$

где ω_p , p_1 , p_2 — резонансная частота и корни характеристического уравнения контура разряда емкости поврежденной фазы; ω_d , δ_d — резонансная частота и коэффициент затухания контура дозаряда неповрежденных фаз; C_{Φ} — суммарная емкость фазы сети относительно земли; $t_{пр}$ — текущее время в момент пробоя; k_{Π} — коэффициент, определяющий долю тока, протекающего в месте уста-

новки защиты (сечение 1-1 на рис. 2). При замыкании на защищаемой линии $k_{\Pi} = 1 - \beta$, а при замыкании в сети (на других линиях) $k_{\Pi} = \beta$, где β - доля емкости фазы выделенной линии от суммарной емкости сети.

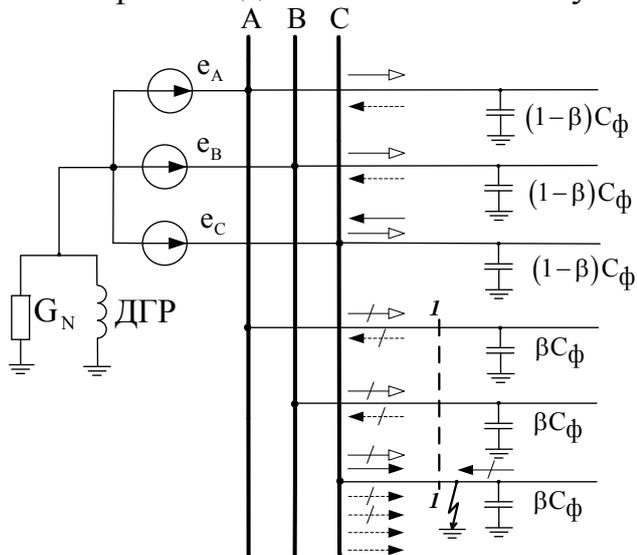


Рис. 2. Токи, обусловленные изменением зарядов фаз сети при дуговом замыкании: \rightarrow , \rightarrow - токи разряда; \dashrightarrow , \dashrightarrow - токи дозаряда; \rightarrow , \rightarrow - токи стекания избыточных зарядов емкостей фаз после обрыва дуги соответственно в поврежденной и неповрежденной линиях.

характеристик токов при перемежающихся замыканиях, например амплитуд гармоник, на площадь под кривой мгновенных значений токов принужденная составляющая оказывает малое влияние.

После погасания дуги емкости всех фаз оказываются соединенными параллельно через малые сопротивления источника питания и нагрузок, и поэтому накопившиеся на них за время горения дуги избыточные заряды выравниваются. В результате этого на суммарной емкости сети в момент погасания дуги устанавливается напряжение, которое из условия постоянства суммарного заряда будет равно:

$$u_{N\Gamma} = \frac{1}{3}(u_{A\Gamma} + u_{B\Gamma} + u_{C\Gamma}),$$

$u_{A\Gamma}, u_{B\Gamma}, u_{C\Gamma}$ - мгновенные значения напряжений фаз в момент погасания дуги.

Эквивалентный контур, определяющий закон изменения тока стекания избыточных зарядов, содержит суммарную емкость фаз элементов сети и элементы цепи нейтрали, в частности параллельно соединенные дугогасящий реактор и дополнительный резистор. Параметры контура стекания избыточных зарядов, в том числе и при комбинированном заземлении нейтрали, таковы, что переходный процесс имеет характер затухающих колебаний с собственной частотой $\omega_{СТ}$, которая равна:

$$\omega_{СТ} = \omega_{\Pi} \sqrt{(1 - \nu) - \left(\frac{d}{2}\right)^2},$$

Порядок отличий амплитуд разрядного и дозарядного токов от амплитуды установившегося тока соответствует отношению частот этих токов к промышленной частоте. Отмеченное обстоятельство о соотношении значений токов имеет двойное значение. Во-первых, в начальной стадии процесса моменты перехода тока замыкания через ноль определяются в основном переходным током дозаряда емкостей неповрежденных фаз, и поэтому дуга может погаснуть в моменты времени t_1, t_2, t_3 , определяемые с достаточной точностью периодом переходного тока дозаряда (рис. 1). Во-вторых, при определении интегральных количественных характе-

где ω_{Π} – промышленная частота; ν – расстройка компенсации; d – коэффициент демпфирования.

Если дуга гаснет при одном из проходов переходного тока замыкания через ноль (t_1, t_2, t_3), то время замкнутого состояния фазы мало. Поэтому из-за большой постоянной времени ток в цепи дугогасящего реактора практически остается равным нулю и напряжение на нейтрали изменяется по закону:

$$u_N = u_{N\Gamma} e^{-\frac{d}{2}\omega_{\Pi}(t-t_{\Gamma})} \cdot \cos[\omega_{CT}(t-t_{\Gamma})], \quad (3)$$

где t_{Γ} – текущее время в момент погасания дуги.

Выражение для тока стекания в соответствии с (3) и с учетом того, что $\frac{d}{2}\omega_{\Pi} \ll \omega_{CT}$, имеет вид:

$$i_{CT} = -\beta u_{N\Gamma} e^{-\frac{d}{2}\omega_{\Pi}(t-t_{\Gamma})} \cdot 3C_{\Phi}\omega_{CT} \sin[\omega_{CT}(t-t_{\Gamma})]. \quad (4)$$

В (4) напряжение $u_{N\Gamma}$ определяется по выражению для мгновенных значений напряжения на неповрежденных фазах при $t = t_{\Gamma}$:

$$u_{N\Gamma} = u_{\text{пр}} e^{-\delta_D(t_{\Gamma}-t_{\text{пр}})} \left[\cos\left(\sqrt{\omega_D^2 - \delta_D^2}\right)(t_{\Gamma} - t_{\text{пр}}) + \frac{\delta_D}{\sqrt{\omega_D^2 - \delta_D^2}} \cdot \sin\left(\sqrt{\omega_D^2 - \delta_D^2}\right)(t_{\Gamma} - t_{\text{пр}}) \right] + u_{N\infty}, \quad (5)$$

где $u_{N\infty}$ – принужденное напряжение на нейтрали.

Если дуга гаснет после затухания переходных емкостных токов, то ток стекания определяется выражением:

$$i_{CT} = -3\beta C_{\Phi} U_{\text{фм}} e^{-\frac{d\omega_{\Pi}}{2}(t-t_{\Gamma})} \left\{ \omega_{CT} \cos[\omega_{CT}(t-t_{\Gamma}) + \varphi_{\Gamma}] \right\}. \quad (6)$$

В этом выражении угол φ_{Γ} зависит от фактического момента погасания дуги. Установившийся ток промышленной частоты в месте замыкания мал, так как его большая часть скомпенсирована, а токи высших гармоник могут быть значительно больше этого тока и они могут определять момент перехода тока замыкания через ноль. В связи с этим, значение угла φ_{Γ} не связано с основным процессом и может принимать любое значение.

Амплитуды и фазы гармоник токов нулевой последовательности определяются как сумма гармоник, порождаемых токами всех стадий дугового замыкания, так как элементы схемы замещения сети приняты линейными. При этом существенным является направление протекания токов (рис. 2), так как при замыкании на защищаемой линии токи, протекающие через место установки защиты (сечение 1-1) на стадии горения дуги и стадии стекания избыточных зарядов, имеют одинаковое направление, а при внешнем замыкании эти токи направлены навстречу друг другу.

Основная частота процесса при перемежающихся замыканиях определяется периодом следования пробоев $T_{пр}$. В работе период процесса определялся приближенно по огибающей восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе, что позволяет учесть основные факторы, влияющие на период: такие как расстройка компенсации, коэффициент демпфирования, пробивное напряжение. Период следования пробоев намного больше времени существования токов разряда и дозаряда (рис. 3), что обуславливает определенные особенности частотных спектров, порождаемых этими токами.

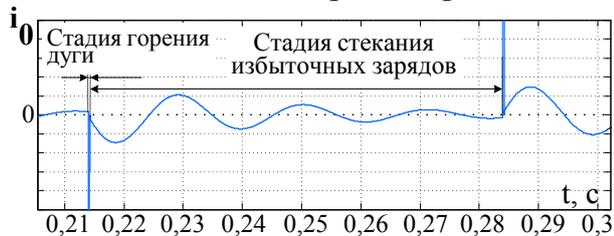


Рис. 3. Ток нулевой последовательности на разных стадиях дугового перемежающегося замыкания.

Частотные спектры токов нулевой последовательности в поврежденной и неповрежденной линии получены разложением в ряд Фурье отдельных составляющих переходных токов и последующего суммирования гармонических составляющих с учетом направления токов согласно рис. 2.

Для тока разряда емкости поврежденной фазы:

$$I_{sk} = \frac{2}{T_1} \int_{t_{пр}}^{\infty} i_p \sin(k\omega_1 t) dt; I_{ck} = \frac{2}{T_1} \int_{t_{пр}}^{\infty} i_p \cos(k\omega_1 t) dt. \quad (7)$$

Для тока дозаряда емкостей неповрежденных фаз:

$$I_{sk} = \frac{2}{T_1} \int_{t_{пр}}^{t_{г}} i_d \sin(k\omega_1 t) dt; I_{ck} = \frac{2}{T_1} \int_{t_{пр}}^{t_{г}} i_d \cos(k\omega_1 t) dt. \quad (8)$$

Для тока стекания избыточных зарядов:

$$I_{sk} = \frac{2}{T_1} \int_{t_{г}}^{\frac{T_1}{2}} i_{сТ} \sin(k\omega_1 t) dt; I_{ck} = \frac{2}{T_1} \int_{t_{г}}^{\frac{T_1}{2}} i_{сТ} \cos(k\omega_1 t) dt, \quad (9)$$

где I_{sk} , I_{ck} – амплитуды синусных и косинусных составляющих гармоник тока нулевой последовательности; k – номер гармоники; T_1 , ω_1 – период и частота первой гармоники процесса.

Пределы интегрирования для разрядного тока можно принять от момента пробоя $t = t_{пр}$ до $t = \infty$, так как этот ток за время горения дуги полностью затухает. Для дозарядного тока пределы интегрирования принимаются от $t = t_{пр}$ до момента погасания дуги $t_{г}$. Например, при погасании в одном из n -х проходов через ноль дозарядного тока (рис. 1):

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

Для иллюстрации основных особенностей частотных спектров на рис. 4 приведены расчетные спектры, полученные для условий сети с обычной компенсацией емкостного тока и сети с комбинированным заземлением нейтрали.

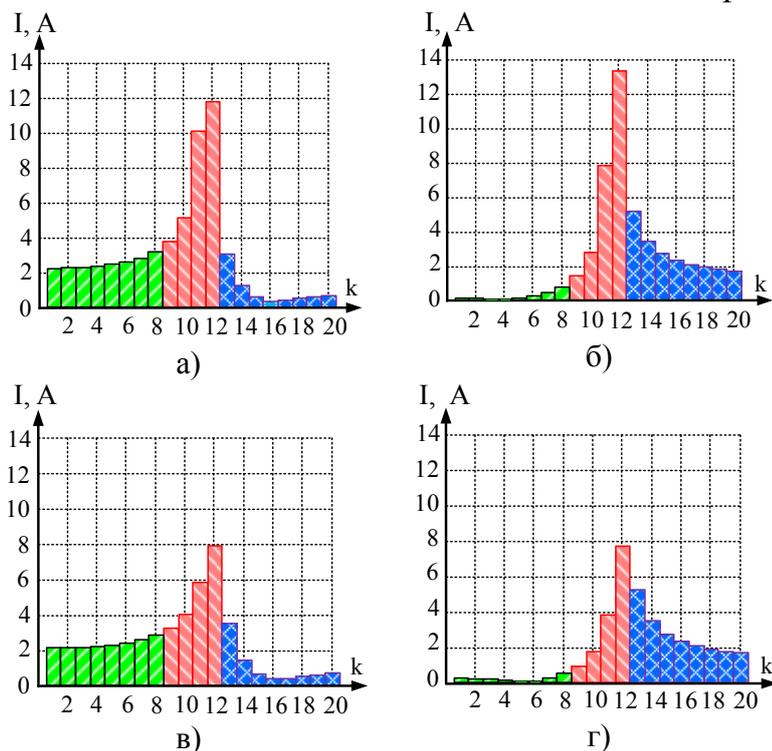


Рис. 4. Амплитудно-частотные спектры тока нулевой последовательности в поврежденной (а, в) и неповрежденной (б, г) линиях для сети с компенсацией емкостного тока (а, б) и комбинированным заземлением нейтрали (в, г). Частота первой гармоники 4,16 Гц.

Для выявления именно качественных особенностей спектров, коэффициент распределения емкостного тока между линиями (β) принят равным 0,5.

Основные особенности полученных спектров заключаются в том, что, во-первых, наибольшую амплитуду примерно одинаковую в поврежденной и неповрежденной линиях, имеет гармоника с частотой тока стекания, которая близка к промышленной частоте, и, во-вторых, в поврежденной линии амплитуды гармоник с частотой ниже промышленной больше амплитуд гармоник с частотой выше промышленной, а в неповрежденной линии наоборот.

Амплитуды гармоник токов нулевой последовательности, особенно в области низких частот, как интегральные величины, отображают изменение зарядов емкостей фаз сети. Поэтому, с учетом направления токов, измеряемое косвенно изменение зарядов в неповрежденной линии после каждого цикла накопления избыточных зарядов при горении дуги и их стекания в бестоковую паузу будет тем меньше, чем полнее стекают избыточные заряды, что имеет место при комбинированном заземлении нейтрали (рис. 5). Количественная оценка влияния степени стекания избыточных зарядов выполнена по величине, пропорциональной энергии спектра в области частот ниже промышленной, в виде

$$\text{суммы квадратов амплитуд гармоник } A_{\text{нч}} = \sum_{k=1}^i I_k^2.$$

При этом для оценки влияния перехода на комбинированное заземление нейтрали приняты такие сочетания расстройки компенсации и коэффициента демпфирования, при которых в том и другом случае период следования пробоев одинаков. В частности в сети с обычной компенсацией принято $\nu = 0,06$; $d = 0,05$. В сети с комбинированным заземлением нейтрали $\nu = 0$, а d увеличено до 0,12 за счет подключения дополнительного резистора. Расчеты выполнены для сети с суммарным емкостным током замыкания на землю, равным 50 А при $n=1$ и $U_{\text{пр}} = 0,9U_{\text{фн}}$.

При этом получено, что режим заземления нейтрали на параметр $A_{нч}$ в поврежденной линии оказывает очень малое влияние, а в неповрежденной линии при комбинированном заземлении нейтрали $A_{нч}$ снижается в 2-3 раза по сравнению с обычной компенсацией. Таким образом, признак различия амплитуд гармоник с частотой ниже и выше промышленной при комбинированном заземлении нейтрали выполняется лучше. При изменении условий перемежающегося замыкания, выявленные качественные особенности спектров тока нулевой последовательности сохраняются, но при этом изменяются абсолютные значения амплитуд гармоник и частота первой гармоники.

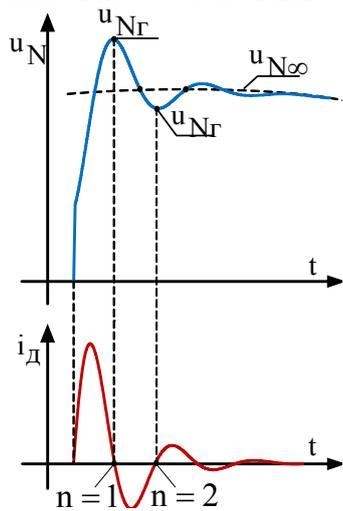
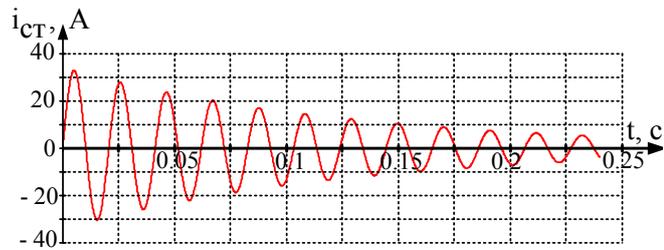


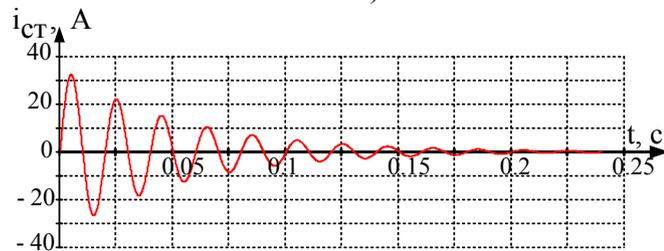
Рис. 6. Пояснение

к согласованному изменению интегральных величин от тока дозаряда и тока стекания.

Важным является то, что при перемежающихся замыканиях как в поврежденной, так и в неповрежденной линиях имеет место большая амплитуда гармоники с частотой, равной частоте тока стекания. Это создает принципиальную основу для выполнения защиты, реагирующей на активную составляющую тока, как при устойчивых, так и при перемежающихся замыканиях в одной полосе частот, так как частота тока стекания не намного отличается от промышленной даже при сравнительно больших значениях расстройки компенсации и коэффициента демпфирования. В частности, при $\nu = \pm 0,2$ и $d = 0,2$ частота тока стекания лежит в пределах от $1,09\omega_{п}$ до $0,89\omega_{п}$.



а)



б)

Рис. 5. Токи стекания избыточных зарядов:

а) сеть с обычной компенсацией емкостного тока

б) сеть с комбинированным заземлением нейтрали.

Наиболее сильными факторами, влияющими на абсолютное значение амплитуд гармоник, являются момент погасания дуги и пробивное напряжение. При изменении момента погасания согласованно изменяются интегральные величины, определяемые током дозаряда и током стекания. Это иллюстрируется на рис. 6, из которого следует, что площадь под кривой мгновенных значений дозарядного тока с учетом знаков при изменении момента погасания дуги согласованно изменяется с напряжением $u_{NГ}$. Поэтому условие компенсации изменения зарядов, как фактор, обуславливающий малое значение амплитуд низкочастотных гармоник в неповрежденной линии, сохраняется. Соотношение амплитуд гармоник сохраняется также при изменении ν и d в реальных пределах, соответствующих условию комбинированного заземления нейтрали.

Фазовые соотношения между током и напряжением нулевой последовательности полностью сохраняются при перемежающихся замыканиях, так как схема замещения нулевой последовательности для стадии горения дуги и для стадии стекания избыточных зарядов такая же, как и при устойчивых замыканиях. Отличие заключается лишь в том, что при устойчивых замыканиях и на стадии горения дуги токи нулевой последовательности вызываются напряжением источника, а на стадии стекания избыточных зарядов – затухающим напряжением свободных колебаний.

В третьей главе описана разработанная математическая модель электрической сети с комбинированным заземлением нейтрали с встроенной моделью дугового перемежающегося замыкания. Модель разработана для получения возможности проведения исследований основных электрических величин, используемых в защите от замыканий на землю с учетом возможного многообразия факторов, влияющих на рассматриваемые электрические величины при дуговом перемежающемся замыкании, в том числе и с учетом их вероятностного характера.

За основу принята схема замещения кабельной сети с суммарным емкостным током замыкания на землю 50 А и номинальным напряжением 10 кВ. Естественный коэффициент демпфирования, обусловленный активными проводимостями фаз сети и потерями в дугогасящих реакторах, принят равным $d_c = 0,05$. Режим комбинированного заземления нейтрали, путем подключения резистора параллельно дугогасящему реактору, создает дополнительную составляющую коэффициента демпфирования d_N , варьируемую в пределах $0,05 \div 0,15$. Для учета влияния распределенности параметров линии они представлены в виде десяти Г-образных RLC ячеек. Заземление нейтрали в модели имитируется индуктивностью и добавочным резистором, подключенными к специальному трансформатору заземления нейтрали.

Задание параметров элементов схемы модели выполнено через их расчет с использованием таких количественных характеристик электрической сети при замыкании на землю, как суммарный емкостной ток, расстройка компенсации и коэффициент демпфирования, а также характеристик переходного процесса, а именно частоты тока разряда поврежденной фазы и дозаряда емкостей неповрежденных фаз, коэффициенты затухания этих токов. Для определения возможного диапазона изменения всех упомянутых величин были использованы данные, полученные в реальных сетях и опубликованные в печати.

Важным элементом является модель дугового промежутка. Процессы при дуговом замыкании моделировались на основании представления его идеальным ключом, который должен замыкаться при достижении заданного пробивного напряжения на поврежденной фазе и размыкаться при одном из задаваемых при расчете переходов тока в месте замыкания через значение, близкое к нулю. Для учета возможности изменения электрической прочности дугового промежутка после погасания дуги предусмотрено изменение пробивного напряжения за время между двумя соседними пробоями.

Для примера на рис. 7 приведены полученные на разработанной модели осциллограммы электрических величин при дуговом перемежающемся замыкании, а на рис. 8 – частотные спектры токов нулевой последовательности.

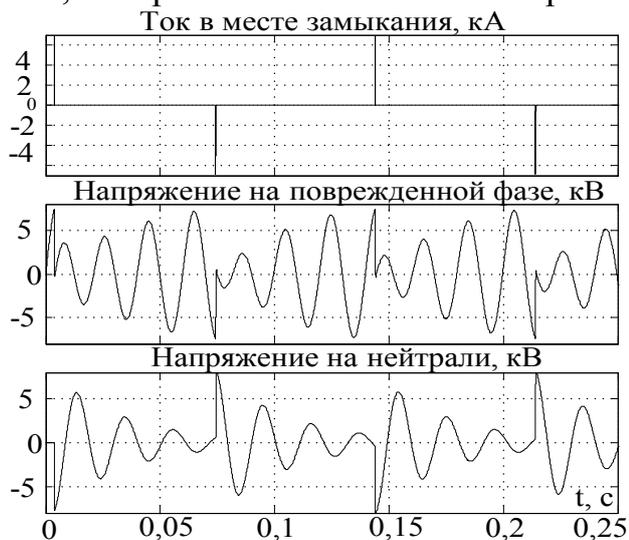


Рис. 7. Осциллограммы при перемежающемся дуговом замыкании, полученные на математической модели электрической сети с комбинированным заземлением нейтрали $\nu = 0,065$; $d_N = 0,15$; $d_c = 0,05$; $U_{пр} = 0,9U_{фм}$; $n = 1$; $\omega_D = 188501/c$; $\delta_D = 41581/c$.

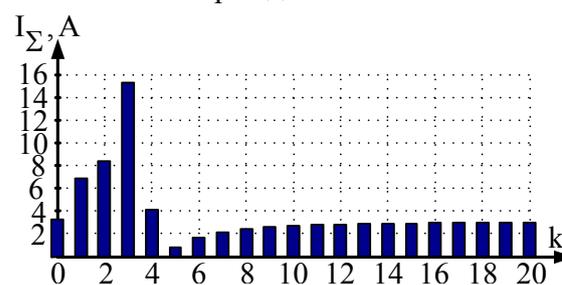


Рис. 8. Амплитудно-частотные спектры токов нулевой последовательности при перемежающемся замыкании по рис. 7. Частота первой гармоники 14,4 Гц.

Как видно, основные, ранее выявленные аналитически, особенности амплитудно-частотных спектров четко проявляются в моделируемых процессах.

Разработанная модель перемежающегося дугового замыкания в электрической сети с комбинированным заземлением нейтрали дает результаты, хорошо согласующиеся с известными теориями электрических процессов при дуговых замыканиях и данными, полученными из опыта эксплуатации реальных электрических сетей.

В четвертой главе исследуются возможные варианты функционального построения защиты от замыканий на землю на основе выявленных особенностей спектров тока нулевой последовательности. В качестве инструмента исследования используется модель процессов при дуговых замыканиях, описание которой приведено выше. Предложены варианты функциональных схем, основанные на использовании активной составляющей тока нулевой последовательности и на использовании различия амплитуд гармоник с частотами ниже и выше промышленной.

Практически предпочтительным является вариант, основанный на использовании активной составляющей тока. В предыдущих разделах показано, что для выполнения защиты на активной составляющей тока могут быть использованы гармонические составляющие с частотой, близкой к промышленной. Фактически спектр токов нулевой последовательности при перемежающихся дуговых замыканиях занимает широкую полосу частот. Поэтому рассмотрен также вариант построения защиты в широкой полосе частот, так как при этом более полно может использоваться энергия сигналов.

Величина, пропорциональная активной составляющей тока, формируется как среднее значение произведения мгновенных значений тока и напряжения нулевой последовательности. Как известно, это среднее значение пропорционально сумме произведений амплитуд сигналов, одинаковых по частоте и совпадающих по фазе, то есть пропорционально активной составляющей тока.

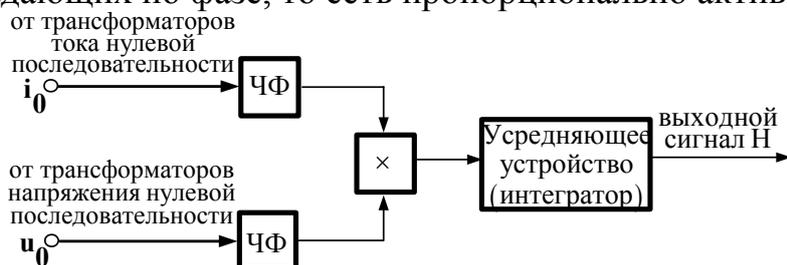


Рис. 9. Функциональный блок – схема устройства защиты от замыканий на землю на активной составляющей тока.

при использовании частотных фильтров (ЧФ) с полосой пропускания от 40 до 60 Гц и с использованием фильтров низких частот с частотой среза 1000 Гц приведены на рис. 10 без учета погрешностей трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности.

Как и следовало ожидать, выходной сигнал в полосе частот 40-60 Гц меньше, чем при использовании частот до 1000 Гц. Однако их отличие невелико, поэтому более предпочтительным является вариант с полосовым фильтром, так как при этом можно ожидать, что помехоустойчивость защиты будет выше.

Даже в таком маловероятном случае, когда емкость защищаемой линии составляет 50 % от суммарной емкости сети, отношение минимального абсолютного значения сигнала при внутреннем замыкании к максимальному значению при внешнем замыкании не менее 10. При меньшем значении емкости защищаемой линии это отношение возрастает. Как отмечено выше, большая амплитуда гармоники с частотой, близкой к промышленной, обусловлена процессом стекания избыточных зарядов после погасания дуги. Однако одна эта составляющая не несет в себе признака поврежденной линии, особенно при ее относительно большой

На рис. 9 приведена функциональная схема, соответствующая принятому варианту выполнения защиты. Значения выходного сигнала для одной из реализаций дугового

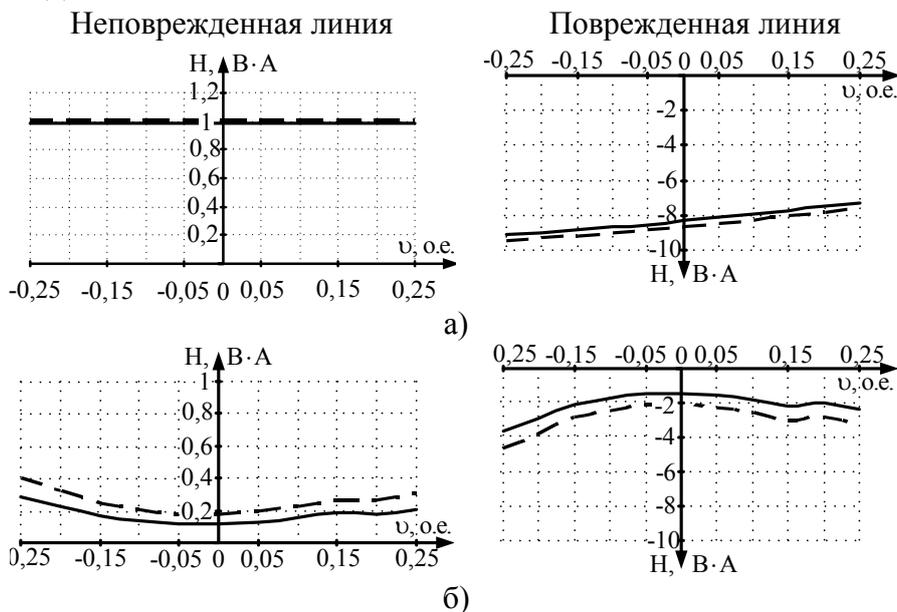


Рис. 10. Сигнал, пропорциональный активной составляющей тока в зависимости от расстройки компенсации без учета погрешностей трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности при $\beta=0,5$; $d_N=0,15$; $d_C=0,05$. а) – устойчивое замыкание; б) – перемежающееся замыкание ($n=1$; $U_{пр}=0,9U_{фм}$). — — — при использовании фильтров низких частот; — при использовании полосовых фильтров.

емкости, так как процессы стекания избыточных зарядов во всех линиях идентичны. Большое отличие сигналов в поврежденной и неповрежденной линии обусловлено взаимно противоположными направлениями токов в поврежденной и неповрежденной линиях на стадии горения дуги и в бестоковую паузу.

Интегральные величины в виде среднего значения произведения напряжения и тока нулевой последовательности, порождаемые процессами на стадиях дугового замыкания в поврежденной линии суммируются, а в неповрежденной вычитаются. При этом, как и при устойчивом замыкании, знаки сигналов, пропорциональных активной составляющей, на поврежденной и неповрежденной линиях различны.

При проведении расчетных экспериментов с включением в модель трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности из-за влияния их погрешностей знак выходного сигнала, соответствующий неповрежденной линии, может изменяться (рис. 11).

Это объясняется тем, что активная составляющая тока в неповрежденной линии весьма мала и поэтому отличие фазового сдвига между током и напряжением от 90° по каждой гармонической составляющей соизмеримо с угловыми погрешностями трансформаторов тока и

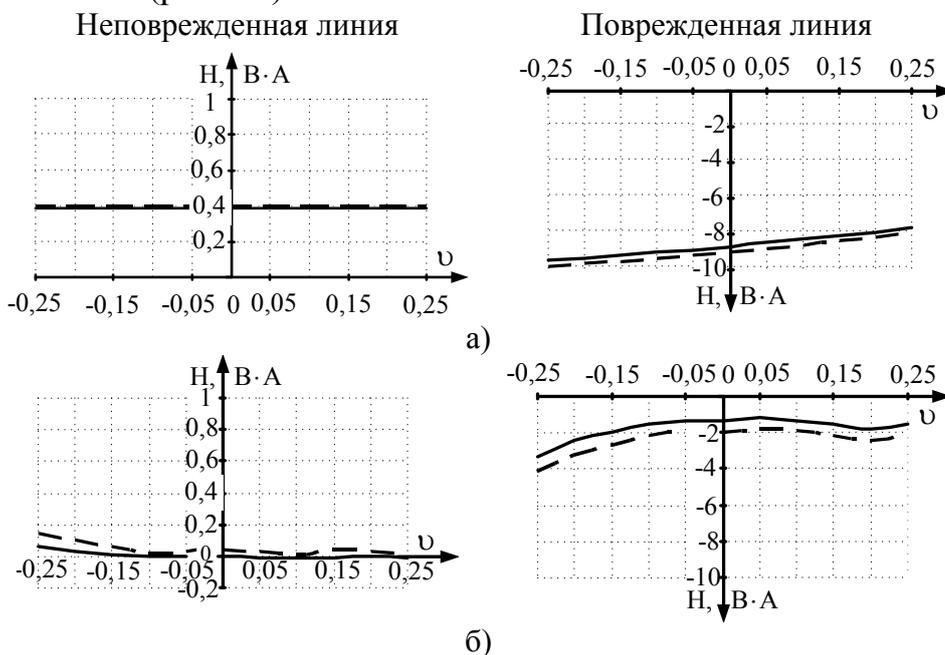


Рис. 11. То же, что и на рис. 10, но с учетом погрешностей трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности.

В связи с этим использование качественного признака по различию направлений токов затруднительно. Выходной сигнал на поврежденной линии при учете влияния погрешностей трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности устойчиво сохраняет знак и намного больше абсолютной величины сигнала на неповрежденной линии, поэтому в качестве признака поврежденной линии практически можно использовать фактор превышения сигналом заданной уставки. Для повышения надежности защиты знак сигнала, который стабилен в поврежденной линии, можно использовать как дополнительный подтверждающий признак.

Отличие амплитуд гармоник с частотой ниже и выше промышленной может использоваться как в сети с компенсацией емкостного тока, так и в сети с комбинированным заземлением нейтрали в сочетании с наложением на сеть контрольного тока с частотой 25 Гц для обеспечения работы защиты при устойчивых замыканиях. Такое исполнение имеет преимущество перед извест-

ными решениями, когда поврежденная линия выявляется по амплитудам низкочастотных гармоник, значение которых зависит не только от места замыкания, но и от характера перемежающегося замыкания.

Функциональная схема для реализации фактора отличия амплитуд гармоник приведена на рис. 12.

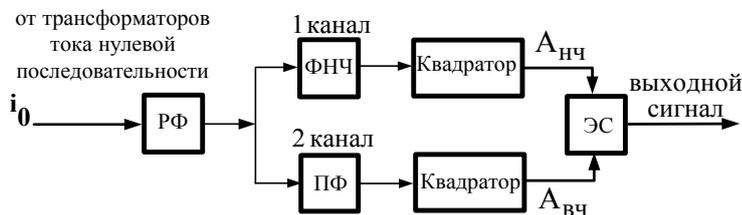


Рис. 12. Функциональная блок – схема устройства защиты от замыканий на землю на сравнении амплитуд гармоник с частотой ниже и выше промышленной.

В качестве количественной меры уровня гармоник в выделяемых областях частот принимается среднее квадратичное значение сигналов на выходе фильтров соответственно $A_{нч}$ и $A_{вч}$. В канале формирования параметра $A_{нч}$ используется фильтр низких частот с частотой среза 40 Гц, а в канале формирования параметра $A_{вч}$ – фильтр с полосой пропускания от 70 до 120 Гц и один на оба канала режекторный фильтр для подавления сигналов с частотой близкой к промышленной. При таких частотных характеристиках исключается влияние естественных высших гармоник при устойчивом замыкании, так как их наименьшая частота составляет 250 Гц. На рис. 13 показаны зависимости $A_{нч}$ и $A_{вч}$ при моделировании дугового замыкания.

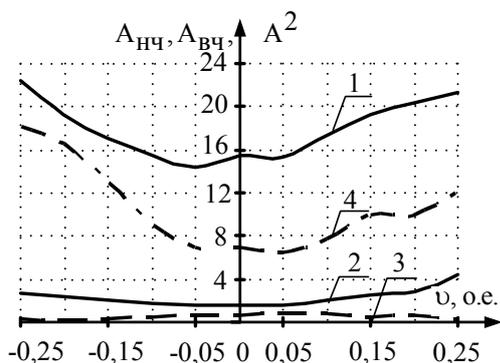


Рис. 13. Зависимость $A_{нч}$ (1) и $A_{вч}$ (2) в поврежденной линии и $A_{нч}$ (3) и $A_{вч}$ (4) в неповрежденной линии в сети с комбинированным заземлением нейтрали $n=1$; $U_{пр} = 0,9U_{фм}$; $d_N=0,15$; $d_c=0,05$; $k_{II}=0,5$.

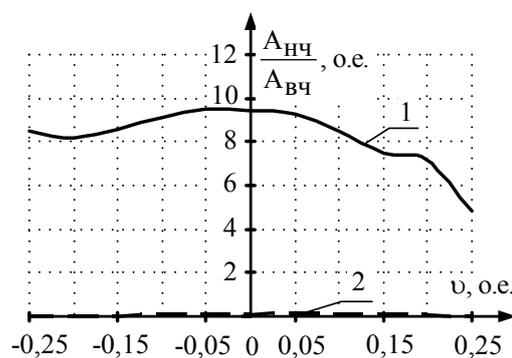


Рис. 14. Зависимость отношения $A_{нч}/A_{вч}$ в поврежденной (1) и неповрежденной (2) в сети с комбинированным заземлением нейтрали при $k_{II}=0,5$.

Рассмотрен также вариант, в котором формируется отношение $A_{нч}/A_{вч}$ с последующим сравнением его значения с заданной уставкой. Результаты расчетов для такого варианта приведены на рис. 14.

Электрические величины, используемые в защите, зависят от ряда факторов в соответствии с (1) – (9), большая часть из которых имеет случайный характер. Поэтому сложно выбрать случаи перемежающегося замыкания, соответствующие наихудшим условиям по селективности и чувствительности. В связи с этим в заключительной части работы выполнено исследование предлагаемых вариантов выполнения защиты с учетом случайного характера факто-

ров, влияющих на электрические величины при перемежающемся дуговом замыкании. Исследование проводилось методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Приведено обоснование принятых законов распределения плотности вероятности учитываемых случайных факторов. В результате соответствующих расчетов получено распределение плотности вероятности для параметров, формируемых в предлагаемых вариантах выполнения защиты при внешних и внутренних замыканиях. За критерий сравнения вариантов принята вероятность неправильной работы защиты, включающая в себя как отказы, так и излишние срабатывания. Эти исследования позволяют корректировать параметры элементов защиты, например, частотные характеристики фильтров, из условия получения минимальной вероятности неправильных действий защиты.

Результаты вероятностной оценки для вариантов выполнения защиты, которые могут быть основой для дальнейшей технической проработки, при $d_N=0,15$, $\beta=0,2$ следующие:

| Вариант выполнения защиты | Вероятность неправильных действий |
|---|-----------------------------------|
| На активной составляющей тока | 2,35 % |
| Сравнение амплитуд гармоник с частотой ниже и выше промышленной | 1,05 % |
| Отношение амплитуд гармоник с частотой ниже и выше промышленной | 0,32 % |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. На основе анализа существующих методов выполнения защиты от однофазных замыканий в условиях применения комбинированного заземления нейтрали установлено, что для разработки защиты, правильно функционирующей при устойчивых и перемежающихся замыканиях на основе использования повышенной активной составляющей тока или на основе использования низкочастотных гармоник, требуется проведение дополнительных исследований процессов при перемежающихся замыканиях.

2. Проведено исследование частотных спектров токов нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях, измеряемых на защищаемых линиях, в результате чего установлено, что:

2.1. Наибольшую амплитуду как в поврежденной, так и в неповрежденной линии имеет гармоническая составляющая тока нулевой последовательности с частотой тока стекания избыточных зарядов, которая близка к промышленной частоте.

2.2. Амплитуды гармонических составляющих тока нулевой последовательности с частотой ниже промышленной в поврежденной линии больше амплитуд гармоник с частотой выше промышленной, а в неповрежденной наоборот. Эта закономерность сохраняется при изменении в реальных пределах фак-

торов, влияющих на электрические величины при перемежающихся дуговых замыканиях.

3. Разработана и реализована на базе компьютерных технологий математическая модель процесса при дуговых перемежающихся замыканиях, включающая в себя модели сети, дугового замыкания, трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности.

4. Предложены и исследованы возможные варианты функциональных схем для выполнения защиты, основанные на использовании выявленных основных закономерностей частотных спектров токов нулевой последовательности. При этом установлено, что:

4.1. Признак по различию направления активной составляющей тока в поврежденной и неповрежденной линии не стабилен из-за влияния погрешностей трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности, а большое отличие абсолютных значений параметра, пропорционального активной составляющей при перемежающихся замыканиях, надежно сохраняется.

4.2. Признак по отличию амплитуд гармоник с частотами выше и ниже промышленной может быть реализован при использовании в качестве количественной меры амплитуд гармоник величины, пропорциональной их энергии в определенных полосах частот.

5. Проведено сравнение предложенных вариантов защиты с учетом вероятностного характера факторов, влияющих на электрические величины при перемежающихся дуговых замыканиях по критерию суммы вероятностей отказов и излишних срабатываний и выделены те из них, которые могут быть основой для дальнейшей технической проработки.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ

1. 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. – С. 138–145. (Всего объем 0,5 п.л., лично автором – 0,15 п.л.).

2. Вайнштейн Р.А. Выявление качественных признаков поврежденного элемента в электроустановках с компенсацией емкостного тока и 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. (Всего объем 0,375 п.л., лично автором – 0,125 п.л.).

3. 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., Юдин С.М. // Электричество. – 2009. – № 12. – С. 26–32. (Всего объем 0,437 п.л., лично автором – 0,15 п.л.).

Другие научные публикации по теме диссертации

4. Пашковский С.Н. О спектральном составе токов нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях в сетях с компенсацией емкостного тока // Вестник Алматинского института энергетики и связи. – 2009. – № 1. – С. 53–56. (Всего объем 0,25 п.л., лично автором – 0,25 п.л.).

5. Пашковский С.Н. Моделирование процессов в электрических сетях при перемежающихся дуговых замыканиях / Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. / Томск. политехн. ун-т. – Томск., 2007. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ 28.09.2007 № 927–В2007. (Всего объем 1,25 п.л., лично автором – 0,7 п.л.).

6. Пашковский С.Н. Анализ электрических величин используемых в защите от замыканий на землю в сети с комбинированным заземлением нейтрали // Труды XIII Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» Т. 1 Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 90–92. (Всего объем 0,15 п.л., лично автором – 0,15 п.л.).

7. Пашковский С.Н. Механизм формирования частотного спектра токов нулевой последовательности при дуговых замыканиях в компенсированных сетях / Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. // Труды XIV Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» Т. 1 Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 82–84. (Всего объем 0,15 п.л., лично автором – 0,08 п.л.).

8. Пашковский С.Н. Основные факторы, влияющие на амплитудно-частотный спектр тока дугового замыкания в компенсированных сетях / Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. // Труды XIV Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» Т. 1 Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 86–88. (Всего объем 0,15 п.л., лично автором – 0,08 п.л.).

9. Пашковский С.Н. О применении программного комплекса Matlab при выполнении задач по усовершенствованию защит от замыканий на землю / Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. // Материалы докладов Всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» в 6-ти частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. Часть 3. – С. 180–182. (Всего объем 0,15 п.л., лично автором – 0,08 п.л.).

10. Пашковский С.Н. Исследование возможности выполнения защиты, реагирующей на активную составляющую тока при устойчивых и перемежающихся замыканиях в сети с комбинированным заземлением нейтрали / Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. // Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: Изд-во КГЭУ, 2009. – С. 158–160. (Всего объем 0,15 п.л., лично автором – 0,08 п.л.).