

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 КВ С НЕЙТРАЛЬЮ, ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЧЕРЕЗ ДУГОГАСЯЩИЙ РЕАКТОР

Кузьменко Д.И.

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

invodi@yandex.ru

### Введение.

Однофазное замыкание на землю в распределительных сетях 6-10 кВ является преобладающим видом повреждений. Наиболее эффективным средством борьбы с негативными последствиями однофазных замыканий без немедленного отключения поврежденного присоединения, является резонансное заземление [1]. При использовании резонансно настроенного дугогасящего реактора в нейтрали возникает проблема с обеспечением селективной защиты [2]. Это связано с тем, что при резонансной настройке реактора, ток нулевой последовательности на поврежденном присоединении имеет небольшую величину, и имеет преимущественно активную составляющую [3].

Большинство из выпускаемых промышленностью устройств защиты от замыканий на землю предназначены для применения в сетях, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через резистор (например, ЗЗН, РТЗ-50, РТЗ-51, ЗЗП-1), и неэффективны в сетях, работающих с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. При резонансной настройке использование токов промышленной частоты (50 Гц) для действия защит от однофазных замыканий, как правило, становится невозможным [2].

### Анализ предшествующих исследований

В последнее время в распределительных сетях находят широкое использование дугогасящие реакторы с подмагничиванием, выполненные на основе магнитного усилителя, ток управления которого регулируется изменением угла запираания тиристоров в мостовой схеме выпрямления. С целью уменьшения потерь активной мощности в нормальном режиме ток управления на реактор не подается и поэтому он имеет большое индуктивное сопротивление. При появлении замыкания на землю в сети 6-10 кВ необходимое напряжение управления для создания тока управления, определенного предварительно регулятором, подается скачком на тиристорный выпрямитель. При использовании форсированного возбуждения индуктивность практически мгновенно достигает значения необходимого для полной компенсации емкостного тока замыкания на землю. Вследствие чего время переходного процесса сильно уменьшается. Таким образом, оценка влияния уменьшения времени протекания переходного процесса при замыкании фазы на землю на чувствительность релейной защиты является актуальной задачей.

**Цель работы.** Произвести анализ существующих методов построения релейной защиты в сетях 6-10 кВ с резонансно заземленной нейтралью от однофазных замыканий на землю. Рассмотреть основные проблемы эксплуатации применяемой релейной защиты, при работе в условиях полной компенсации однофазного тока замыкания на землю, при применении усовершенствованной системы управления дугогасящим реактором с подмагничиванием.

### Материал и результаты исследований

**Основные требования, предъявляемые к релейной защите.** Требования к защите от замыканий на землю в компенсированных сетях существенно отличаются от требований к защитам, применяемых при других режимах работы нейтрали. Так как замыкание на землю не является аварийным режимом, то релейная защита может действовать как на отключение, так и на сигнализацию, в зависимости от типа потребителей, подключенных к поврежденному присоединению. В последнем случае присоединение с замыканием на землю, согласно ПУЭ, может работать довольно длительное время, до 2 ч.

При срабатывании релейной защиты на сигнализацию, дежурный персонал принимает меры к переводу нагрузки поврежденного присоединения на другой источник питания, тем самым, разгружая поврежденное присоединение, и подготавливает его к отключению без прерывания электроснабжения потребителя.

Защиты от замыканий на землю должны быть селективными и иметь высокую чувствительность. Последнее обусловлено тем, что токи нулевой последовательности, на которые реагируют защиты, после компенсации ничтожно малы, до 1 А. Кроме того, необходимо, чтобы данная защита также реагировала не только на глухие замыкания на землю, но также и на перемежающуюся дугу.

Наиболее простое решение проблемы селективной защиты (при работе только на отключение) дает применение токовых защит нулевой последовательности, алгоритмы функционирования которых достаточно просты и реализованы во всех известных микроэлектронных устройствах (например, РТЗ-50, РТЗ-51 и др.) и микропроцессорных терминалах (SPAC-801, БМРЗ и др.) для присоединений 6-35 кВ [2]. Однако в условиях полной компенсации, вследствие значительного уменьшения тока замыкания на землю, применение этих устройств малоэффективно.

Переходные процессы по току и напряжению нулевой последовательности возникают не только при замыканиях, но и в некоторых режимах без них (например, при коммутациях выключателей или разъединителей, при внешних КЗ и т.д.). Форма и параметры входных сигналов в некоторых режимах без замыканий на землю могут быть близкими к форме и параметрам входных сигналов защиты при внутренних и внешних замыканиях [1].

Поэтому защита не должна реагировать на переходные и установившиеся режимы присоединения при отсутствии замыканий на землю. Таким образом, наиболее эффективное решение в части защиты от однофазных замыканий на землю для электрических сетей 6-10 кВ может быть построено при использовании следующих принципов [3]:

- обеспечение возможности использования защиты, селективности и высокой устойчивости ее функционирования в сетях, работающих с резонансным заземлением нейтрали;
- обеспечение селективности и высокой устойчивости функционирования защиты независимо от степени компенсации (недокомпенсация, перекомпенсация, резонансная настройка дугогасящих реакторов) емкостного тока замыкания на землю;
- фиксация всех разновидностей однофазных замыканий: устойчивых замыканий, кратковременных самоустраивающихся пробоев изоляции, прерывистых дуговых, в том числе дуговых перемежающихся;
- непрерывность действия при устойчивых замыканиях и при прерывистых дуговых замыканиях с заданной максимальной частотой следования повторных пробоев изоляции;
- направленность действия устройства защиты в переходных и установившихся режимах защищаемой электрической сети 6-10 кВ и разновидностях однофазных замыканий;
- возможность работы в электрических сетях с кабельными или воздушными линиями электропередачи с кабельными вставками;
- возможность использования для действия защиты электрических величин как установившихся, так и переходных процессов и высших гармонических составляющих нулевой последовательности при замыканиях на землю (подключение защиты по цепям тока к трансформатору тока нулевой последовательности, по цепям напряжения – к вторичной обмотке трансформатора напряжения нулевой последовательности, соединенной в разомкнутый треугольник);
- правильное определение поврежденного присоединения, как в переходных, так и в установившихся режимах;
- обеспечение несрабатывания защиты в режимах без повреждений (коммутационные переключения в сети, пуски электродвигателей и др.), устойчивости защиты к различного рода помехам и наводкам по цепям тока и напряжения посредством пускового органа по напряжению  $3U_0$ .

**Принципы выполнения защит.** В качестве простейшей защиты от однофазных замыканий на землю может быть использована общая неселективная защита, без указания поврежденного присоединения. Она построена на принципе срабатывания указательного реле, включенного на напряжение нулевой последовательности. В современных компенсированных сетях она является наиболее эффективной. Хотя поиск поврежденного присоединения приходится производить поочередным отключением [1].

Для обеспечения селективной работы защиты используется различие в величине и направлении токов, которые появляются в поврежденном и неповрежденном присоединении при однофазных замыканиях. Защита должна реагировать на это различие только на поврежденном присоединении, и не работать на остальных.

В связи с тем, что в компенсированных сетях токи, возникающие в поврежденных и неповрежденных присоединениях, обладают недостаточно четкими и устойчивыми различиями, создание селективной защиты от однофазных замыканий на землю является сложной задачей, которая пока еще не имеет полноценного и подтвержденного опытом эксплуатации решения.

Для решения этой задачи в компенсированной сети приходится создавать искусственные токи или использовать установившиеся остаточные некомпенсированные токи или применять защиты, реагирующие на токи и напряжения, возникающие в переходном режиме в начальный момент повреждения.

**Защиты, реагирующие на остаточные токи компенсированной сети.** При замыкании на землю в сетях с резонансно заземленной нейтралью, дугогасящий реактор компенсирует емкостной ток только основной частоты. Однако ток замыкания на землю содержит, кроме основной гармоники, составляющие высших гармоник, а также активную составляющую основной частоты, которые остаются некомпенсированными.

Активная составляющая тока замыкания на землю обуславливается активным сопротивлением дугогасящего реактора и сопротивлением, определяющем активные потери в сети. Значение этой составляющей имеет небольшое значение и достигает 3-5 % тока реактора [2]. Активная составляющая тока реактора замыкается только через поврежденное присоединение. На эту составляющую и должна реагировать защита.

Такая защита выполняется с помощью фазоопределяющих устройств, например, реле мощности косинусного типа.

Составляющие высших гармоник в установившемся емкостном и индуктивном токе при замыканиях на землю вызваны наличием гармонических составляющих в э.д.с. генераторов и искажений, связанных с нелинейностью нагрузок силовых трансформаторов.

Значение тока в поврежденном присоединении равно сумме всех основных и высших гармоник токов неповрежденных присоединений и тока дугогасящего реактора, который содержит много гармоник. В резуль-

тате ток поврежденного присоединения содержит значительно больше гармоник, чем любое из неповрежденных.

Принципиально можно выполнить устройство сигнализации, реагирующее либо на определенную гармоническую, либо на содержание всех высших гармонических в токе нулевой последовательности, что более целесообразно. Такая токовая защита выполняется на устройствах, реагирующих на сумму высших гармоник тока нулевой последовательности. Примером являются устройства УСЗ-2/2, УСЗ-3М и УСЗ-3 [2], предназначенные для селективной сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6—10 кВ с заземленной через дугогасящий реактор нейтралью. Они реагируют на содержание всех высших гармонических в установившемся токе нулевой последовательности. На рис.1 в упрощенном виде показана принципиальная схема устройства УСЗ 2/2[2].

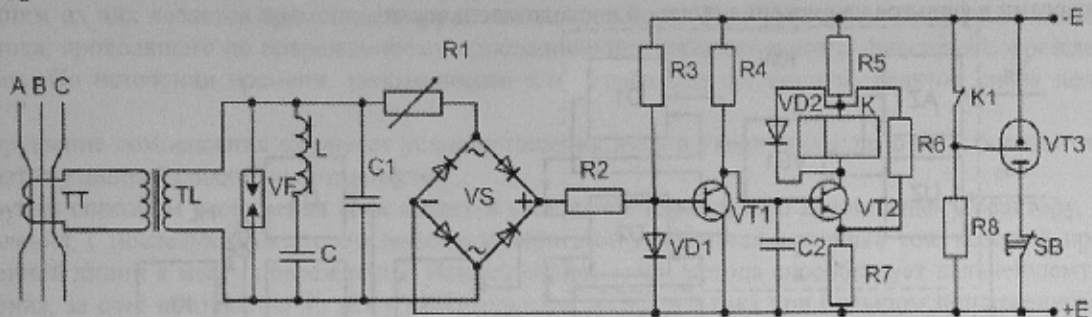


Рисунок 1 – Схема устройства селективной сигнализации при замыкании на землю в кабельных сетях типа УСЗ 2/2

Несколько иную схему имеют устройства УСЗ-3М и УСЗ-3. Конструкция устройства УСЗ-3М предусматривает возможность его применения в качестве стационарного и переносного. Устройство УСЗ-3 применяется совместно с токоизмерительными клещами.

Основным недостатком такого способа является невозможность обеспечения селективной защиты, при наличии сильного различия между емкостями отходящих присоединений, которые всегда присутствуют в разветвленной электрической сети.

**Защиты, реагирующие на токи неустановившегося режима.** К этой группе относится два вида защит. Первые реагируют на появление токов высокой частоты, другие на знак волн тока или соответствующей ему мощности.

Токи высокой частоты возникают во время переходного процесса при замыканиях на землю. Их появление обуславливается разрядкой емкости поврежденной фазы и подзарядкой емкостей неповрежденных фаз, поскольку напряжение на них возрастает до линейного.

Указанный процесс носит характер периодических затухающих колебаний. Частота колебаний и скорость их затухания определяются параметрами сопротивлений ( $R, L, C$ ) зарядного и разрядного контуров. Расчеты показывают, что частота колебаний переходного тока находится в диапазоне 200-3000 Гц, в зависимости от конфигурации сети, а время затухания изменяется в пределах от 0,01 до 0,025 сек [2].

На поврежденном присоединении переходной ток имеет максимальное значение. На неповрежденном присоединении величина тока имеет меньшее значение, а его направление противоположно направлению тока в поврежденном присоединении.

Такая защита выполняется с помощью быстродействующих устройств, подключаемых через фильтр, который пропускает только токи высокой частоты.

В свое время в Одессаэнерго были предложены защиты, использующие тиратронное и электромеханическое реле [4, 5]. Проблема состоит в том, что необходимы быстродействующие реле, способные зафиксировать кратковременные импульсы переходного тока. Недостаток такой защиты состоит в том, что она не реагирует на установившиеся токи повреждения. В связи с этим, невозможно повторное срабатывание реле, возвращенного в начальное положение при проверке наличия на линии, на которой срабатывает защита, устойчивого повреждения. Кроме того, вызывает затруднение расчет токов переходного процесса, которые зависят от момента возникновения повреждения, переходного сопротивления, в частности сопротивления дуги.

В связи с этим, ток срабатывания защиты рекомендуется выбирать по условию отстройки от собственного емкостного тока присоединения [4]. Промышленный выпуск таких защит отсутствует, и распространения они не получили.

**Защита, реагирующая на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса.** Принцип действия защиты, реагирующей на волновые процессы, основан на появлении в момент замыкания на землю электромагнитных волн, обусловленных разрядом емкости поврежденной фазы. Разряд емкости, характеризующийся появлением волн тока и напряжения нулевой последовательности, происходящий в начальный момент замыкания, и растекающийся в обе стороны от места повреждения по контуру фаза земля. Знак тока и мгновенной мощности в поврежденном и неповрежденном присоединениях будет различным. Это различие в знаках, используется при построении защит, реагирующих либо на знак волны тока, либо на знак мгновенной мощности на фронте волны.

Для построения таких защит применяются устройства, сравнивающие направление тока с направлением напряжения нулевой последовательности, в поврежденном присоединении они сонаправлены, или устройства, реагирующие на знак мощности переходного процесса.

Исследования показывают [6], что в начальной стадии переходного процесса результирующая мощность нулевой последовательности и мощность электромагнитной волны имеют одинаковые знаки. Это позволило выполнить импульсную направленную защиту нулевой последовательности типа УЗС, подключаемую к стандартным измерительным трансформаторам тока и трансформаторам напряжения. Структурная схема защиты показана на рис. 2.

Фиксация повреждения устройством осуществляется через 15—20 мкс от начала возникновения повреждения. Этим исключается возможное влияние начальных искажений на работу защиты, вызванных переходными процессами в фильтре напряжения нулевой последовательности.

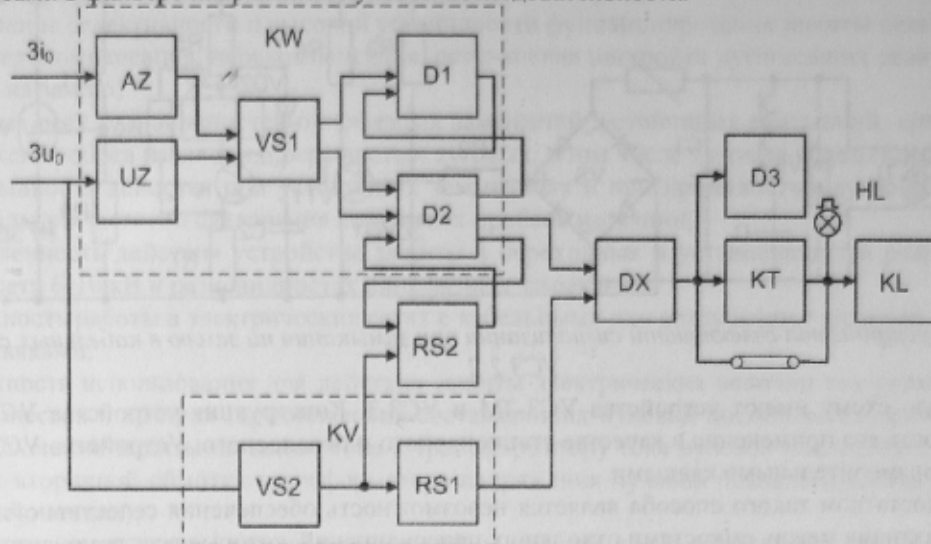


Рисунок 2 – Функциональная схема защиты от замыкания на землю, реагирующей на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса

Выпускают также устройства защиты УЗС-01 и другие аналогичные реле [7].

Недостатком описанного устройства является возможность отказа действия релейной защиты, в случае если замыкание на землю происходит в области малых значений  $3U_0$ . Необходимо отметить, что принцип, на котором основаны эти защиты, пока не получил широкого распространения.

Другие устройства являются комбинированными и могут содержать несколько различных защит и устройств автоматики, в том числе и защиту от замыкания на землю. Например, устройство микропроцессорной защиты линий 6-35 кВ "Сириус-МЛ" [8].

Устройство "Сириус-МЛ" предназначено для работы в качестве комплексной защиты воздушных или кабельных линий с изолированной или компенсированной нейтралью напряжением 6-35 кВ. В устройстве предусмотрена возможность отключения линии или сигнализации при обрыве одного из фазных проводов по наличию тока обратной последовательности  $I_2$ . Защита от замыканий на землю выполнена с использованием высших гармоник, что позволяет избежать зависимости от наличия компенсации сети. Предусмотрен также вариант организации защиты от замыканий на землю по току первой гармоники, включая использование направленности.

В устройстве реализована функция резервирования отказа выключателя с выдачей сигнала отказа на выключатель ввода или секции. Любая аварийная ситуация, отключение или неисправность, сопровождается замыканием контактов независимого реле предупредительной сигнализации.

В устройстве имеются: программируемое двукратное АПВ, ускорение при включении, функция УРОВ, обработка внешних сигналов АЧР с ЧАПВ, а также постоянное самотестирование с выдачей сигнала неисправности контактами реле "Отказ". В случае срабатывания токовой защиты дополнительно определяется вид и ориентировочное расстояние до места повреждения.

При срабатывании защиты устройство запоминает параметры срабатывания для последующего анализа обслуживающим персоналом. В число запоминаемых параметров при однофазных замыканиях входит ток нулевой последовательности  $3I_0$ .

Информация фиксируется в памяти устройства в порядке поступления и сохраняется о 9 последних отключениях. Информация о каждой последующей аварии фиксируется, стирая из памяти информацию о самом "старом" КЗ. Отключение при неуспешном АПВ фиксируется как отдельная авария. Ход часов и зафиксированные данные в памяти сохраняются при пропадании оперативного питания на время не менее 72 часов.

Устройство имеет режим "Контроль", позволяющий выводить на встроенный индикатор текущие значения фазных токов и напряжений, ток  $I_2$ , ток  $3I_0$ , ток высших гармоник  $3I_{0\text{гарм}}$ , состояние логических входных сигналов, а также контролировать ход встроенных часов. Функции защиты при этом полностью сохраняются.

При установке изделия на подстанции в него вводятся следующие уставки: значения токов срабатывания трех ступеней защиты (во вторичных значениях); значения выдержек времени при срабатывании всех четырех ступеней МТЗ; значения напряжения комбинированного пуска, параметры направленной защиты; пороговая чувствительность по току  $I_2$  для обнаружения обрыва провода; пороговая чувствительность по току  $3I_0$  высших гармоник, а также по току  $3I_0$  и напряжению  $3U_0$  первой гармоники для обнаружения однофазных замыканий на землю; текущие дата и время.

Аналогично вводятся дискретные уставки конфигурации защиты, определяющие наличие или отсутствие какой-либо из защит или вид их действия.

#### **Защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности, создаваемые искусственным путем**

Существует несколько способов искусственного создания тока.

Одним из них является временное нарушение компенсации. Под действием емкостного некомпенсированного тока, проходящего по поврежденному присоединению, работает защита, фиксируя поврежденное присоединение. По истечении времени, необходимого для срабатывания защиты, реактор снова должен быть включен.

Нарушение компенсации ухудшает условия гашения дуги и увеличивает вероятность развития повреждения, поэтому данный способ не применяется.

Другим способом увеличения тока является включение параллельно дугогасящему реактору, активного сопротивления, с последующим его отключением. При этом появляется активный ток, который проходит по поврежденной линии к месту повреждения. Использование этого метода способствует дальнейшему развитию повреждения, за счет протекания по нему значительного активного тока при большом приложенном напряжении. Этот метод также не получил применения.

Третьим способом создания искусственного тока является работа с постоянной перекомпенсацией, при которой ток реактора выбирается больше емкостного тока сети. Величина избыточного тока ограничивается условиями гашения дуги и предупреждения развития повреждения. Для сетей 6-10 кВ значение этого тока не должно превышать порядка 15-25 А.

Расстройка компенсации, хотя и в небольших пределах, ухудшает условия работы сети. Поэтому этот метод не является желательным.

Четвертым способом создания тока является наложение на ток повреждения тока промышленной частоты 100-25 Гц, подаваемого от специального источника в цепь дугогасящего реактора. Защита реагирует на направления этого реактора. Частота выбирается из условия, что данная гармоника отсутствует в емкостном токе замыкания на землю. Данный способ не ухудшает условий компенсации, но широкого применения не получил, в данное время некоторые исследователи для повышения надежности работы защиты проводят исследования с применением наложения тока более низкой частоты [9].

Пятым способом создания искусственного тока является протекание частичного тока нагрузки в месте замыкания на землю при кратковременном шунтировании поврежденной фазы коммутатором. Данный способ дает возможность кратковременно, увеличить чувствительность защиты, что значительно повысит надежность работы системы.

#### **Трансформаторы тока нулевой последовательности.**

На правильное определение поврежденного присоединения влияет не только принцип построения защиты, а устройства помогающие преобразовать истинные значения в те, которые затем обрабатываются защитой. В компенсированной сети, при малых остаточных токах (после компенсации) в месте повреждения, особое внимание следует уделить трансформаторам тока нулевой последовательности.

При небольших первичных токах нулевой последовательности от трансформатора тока может быть получена лишь небольшая мощность (порядка долей ВА), при этом часто допускаются относительно большие токи намагничивания и, соответственно, возникают недопустимо большие токовые и угловые погрешности. Определение токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока ГОСТом не регламентируется [10]. В литературе, посвященной проблемам выполнения защит от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю, данные по этим погрешностям не указывают. В то же время трансформатор тока нулевой последовательности является определяющим элементом с точки зрения выполнения и условий применимости защит нулевой последовательности от однофазных замыканий в указанных сетях, обладающих высокой степенью устойчивости функционирования при внутренних и внешних повреждениях. Недопустимо большие токовые и угловые погрешности часто приводят к неправильным действиям защиты.

В целях определения токовых и угловых погрешностей проведены экспериментальные исследования технических характеристик основных исполнений кабельных трансформаторов типов ТЗ, ТЗЛ, ТЗЛМ, ТЗРЛ, ТЗЛЭ. Проведены исследования погрешностей с присоединенными реле типов РТ-40/0.2, РТЗ-50, РТЗ-51, УСЗ-2/2, УСЗ-3М, ЗЗП-1М, ЦНУСЗ "Импульс", УСЗ "Спектр" [11], принцип работы некоторых аппаратов приведен выше.

В результате исследований погрешностей на 13 различных частотах (1 - 21, 41, 61 гармоника промышленной частоты), при изменении тока от 0,2 до 3,0 А с шагом 0,2 А, было получено наличие в первичном и вторичном токах трансформатора кроме основной гармоники каждой частоты, присутствуют высшие гармоники и высокочастотные случайные составляющие (шумы), генерируемые элементами схемы и самим трансформаторами, а также различного рода помехами и наводками рис. 3

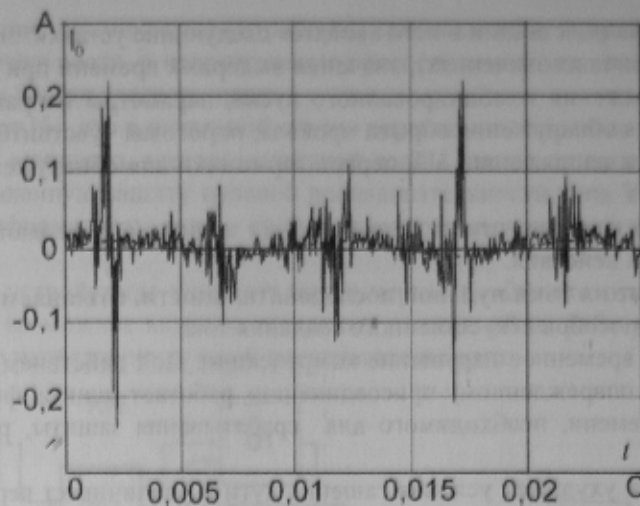


Рисунок 3 – Изменение измеряемого сигнала под действием шумов в трансформаторе тока нулевой последовательности:

— реальный ток вторичной обмотки трансформатора;  
 --- ожидаемый ток вторичной обмотки трансформатора.

Эти составляющие существенно искажают как форму, так и амплитуду контролируемых сигналов и значительно влияют на величину токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока при малых первичных токах (доли ампер). Оценка погрешностей трансформаторов, для устранения влияния этих составляющих, проводилась только по основным гармоническим составляющим первичного и вторичного тока. Сглаживание (без потери информации об основной гармонической составляющей сигнала) выполнялось исследователями методами регрессионного анализа и преобразования Фурье. Оба метода дают практически одинаковые результаты. Однако при кратковременном шунтировании поврежденной фазы, значение тока нулевой последовательности значительно увеличивается, за счет протекания через место повреждения части активной составляющей тока нагрузки, что резко уменьшает угловую и амплитудную погрешность.

#### ВЫВОД

1. Основными недостатками токовой защиты, реагирующей на высшие гармонические составляющие в установившемся токе нулевой последовательности, являются излишние срабатывания, которые вызваны кратковременностью переходного процесса при использовании управляемого реактора с форсированным возбуждением, часто изменяющимися конфигурациями сетей, режимами и нагрузками в процессе эксплуатации.

2. Защита, реагирующая на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса, оказалась наименее удовлетворяющей основным требованиям чувствительности, селективности и надежности вследствие значительной погрешности измерительных органов тока, связанной с малыми его значениями.

3. Выявлена возможность повышения надежности срабатывания релейной защиты при увеличении тока нулевой последовательности искусственным путем за счет применения устройства шунтирования поврежденной фазы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобровов Н.В. Релейная защита. – М.: Энергия, 1971. – 624с.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 2006. – 639с.
3. Сивокобиленко В.Ф. Обазев П.В. Кузьменко Д.І. Удосконалення системи керування дугогасним реактором с підмагніченням. // Вісник КДПУ. Випуск 3/2007 (44). Частина 2
4. Дарченко В. Е., Степков Т. В. Защита от замыкания на землю в компенсированных сетях // Электричество. 1956. № 2.
5. Шуть В. В. Защита от замыканий на землю // Одесское книжное издательство, 1959.
6. Попов И. Н., Лачугин В. Ф., Соколов Г. В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М., 1986. 248 с.
7. Борухман В. А. Об эксплуатации селективных защит от замыкания на землю в сетях 6—10 кВ и мероприятия по их совершенствованию // Энергетик. 2000. № 1. С. 20-21.
8. ЗАО «Радиус Автоматика». Устройство микропроцессорной защиты ввода «Сириус2В». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. – М., 2005.
9. Шуин В.А., Гусенков А.В. Принципы выполнения микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю для компенсированных сетей 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. Вып 2. - Иваново, 2004. - С. 89-102.
10. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2002. - 23 с.
11. Гусенков А.В. Определение погрешностей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности // Вестник научно-промышленного общества. Вып. 9. - М.: "АЛЕВ-В", 2005. - С. 28 - 37.