

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ В СЛУЧАЕ ГЛУБОКОГО НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА*

В.Е. ГЛАЗЫРИН¹, И.И. ЛИТВИНОВ², А.И. НАУМОВА³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций. E-mail: be@pst.power.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций. E-mail: litvinov.2013@corp.nstu.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры электрических станций. E-mail: naumova_sanya@mail.ru

В настоящей статье представлен усовершенствованный дифференциально-фазный алгоритм, предназначенный для применения в продольной дифференциальной защите (ДЗ) сосредоточенных объектов. Усовершенствованный алгоритм сравнения фаз улучшает точность действия ДЗ в условиях насыщения измерительных трансформаторов тока. В исследовании используется математическая модель дифференциальной защиты силового трансформатора, созданная с учетом группы соединения обмоток трансформатора. Представленный метод защиты позволяет существенно снизить погрешность замера фаз по сравнению с распространенными на практике методами цифровой фильтрации.

Ключевые слова: релейная защита, дифференциальная защита, силовой трансформатор, дифференциально-фазная защита, насыщение трансформаторов тока

ВВЕДЕНИЕ

Современная цифровая дифференциальная защита (ДЗ) способна определить место возникновения повреждения, сопровождающегося большими аварийными токами, в течение первого периода переходного процесса [1]. Некоторые производители в случае фиксации внешнего повреждения предусматривают блокировку ДЗ на время, достаточное для устранения защитами по-

* Статья получена 01 октября 2019 г.

вреждения на смежном участке [2, 3]. Указанные мероприятия обеспечивают отстройку ДЗ от экстремальных переходных токов небаланса, вызванных насыщением измерительных трансформаторов тока (ТТ) со стальными сердечниками.

Однако блокировка ДЗ или снижение ее чувствительности нежелательны, поскольку вследствие развития аварии и отказа защит смежных элементов (вследствие технического несовершенства или в результате ошибок эксплуатации) внешнее короткое замыкание (КЗ) может перейти во внутреннее.

В характеристике срабатывания ДЗ производства компании Siemens предусмотрен участок, при попадании в который рабочей точки происходит отключение защищаемого объекта, даже если ранее было зафиксировано внешнее повреждение [2, 3]. Однако попадание рабочей точки в указанную область и ее длительное нахождение в ней возможно только при отсутствии вытекающего тока нагрузки и при отсутствии подпитки со стороны смежной энергосистемы. Защита фирмы General Electric в случае фиксации внешнего повреждения активирует функцию сравнения фаз основных гармоник токов плеч ДЗ [3]. Однако глубокое насыщение ТТ приводит к существенным погрешностям замера амплитудных и фазовых значений гармоник, что снижает вероятность корректной работы алгоритма [3]. В [3] отмечается, что в случае глубокого насыщения ТТ его угловая погрешность по первой гармонике может достигать 46 электрических градусов (эл. град). Следовательно, необходимо повышение точности работы ДЗ в условиях значительных погрешностей ТТ.

Как указывается в [3, 4], при больших токах внешних и внутренних повреждений предпочтение следует отдавать именно дифференциально-фазному принципу. В связи с вышесказанным необходимо повысить точность работы дифференциально-фазного принципа в случае глубокого насыщения трансформаторов тока. Поставленная цель может быть достигнута путем выделения временных интервалов переходного процесса, на протяжении которых погрешность работы трансформаторов тока минимальна (далее эти интервалы будут обозначены как интервалы идеальной трансформации). При этом нужно найти надежный метод определения этих интервалов, а также определить порядок использования полученной информации для улучшения работы ДЗ.

1. ИДЕЯ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО МЕТОДА

Рассмотрим действие этого алгоритма на примере ДЗ силового трансформатора, так как этот случай является одним из самых сложных. Правильная работа алгоритма может быть обеспечена только в случае соединения обмоток силового трансформатора в звезду, поскольку необходим непосредствен-

ный контроль токов их вторичных обмоток. Это требование выполнимо для цифровых терминалов релейной защиты, в которых компенсация фазового сдвига между токами плеч ДЗ осуществляется алгоритмически.

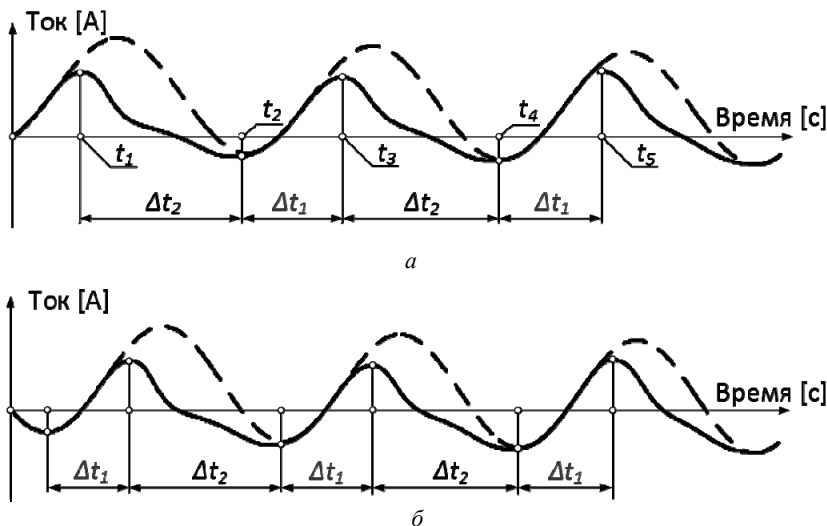


Рис. 1. Первичный (пунктирная линия) и вторичный (сплошная линия) токи в обмотках ТТ при глубоком насыщении магнитного сердечника:

а – насыщение ТТ при первой полуволе ПП; б – то же при второй полуволе

Принцип нахождения участков идеальной трансформации при насыщении ТТ предлагается следующий. Предполагается, что ДЗ переходит на дифференциально-фазный принцип работы только после фиксации внешнего КЗ. В этом случае насыщение, приводящее к экстремальным погрешностям, обусловлено значительным содержанием аperiodической составляющей в аварийном токе, а в установившемся режиме погрешность ТТ не превышает 10 % [5]. На рис. 1 приведены осциллограммы первичного и вторичного токов в обмотках измерительного ТТ при насыщении его сердечника под воздействием тока, содержащего аperiodическую составляющую [6]. Насыщение сердечника ТТ может происходить при прохождении первой (рис. 1, а) или второй (рис. 1, б) полувольты тока КЗ. Рассмотрим первый случай. Насыщение ТТ наступает в моменты времени t_1 , t_3 и t_5 . Даже в условиях глубокого насыщения измерительный ТТ имеет участки идеальной трансформации, которая начинается приблизительно в моменты времени t_2 и t_4 , т. е. тогда, ко-

гда первая производная первичного (и вторичного) тока изменяет знак. При насыщении ТТ интервалы времени между моментами смены знака первой производной тока неодинаковы. Условимся обозначать больший из этих интервалов как Δt_2 , а меньший – как Δt_1 . Для рассматриваемого примера $\Delta t_1 = t_3 - t_2$, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ в первом периоде и $\Delta t_1 = t_5 - t_4$, $\Delta t_2 = t_4 - t_3$ во втором периоде. Из примера на рис. 1, а видно, что участкам идеальной трансформации соответствуют интервалы Δt_1 , а участкам работы ТТ со значительной погрешностью – интервалы Δt_2 .

Аналогичные явления наблюдаются, если насыщение ТТ происходит при прохождении второй полуволны тока (рис. 1, б). Отличительной чертой этого режима является лишь то, что с момента начала ПП интервал Δt_1 фиксируется раньше интервала Δt_2 (в примере на рис. 1, а первым фиксируется интервал Δt_2). Во всех рассмотренных случаях идеальная трансформация наступает практически в момент начала интервала Δt_1 и продолжается практически до конца этого интервала.

Ввиду наличия аperiodической составляющей в аварийном токе метод замера фаз по переходу тока через нуль приводит к значительным погрешностям. По этой причине замер разности фаз необходимо осуществлять в моменты достижения синусоидальным сигналом амплитудного значения, т. е. именно в начале интервала Δt_1 . Для этого интервалы Δt_1 и Δt_2 должны регистрироваться для всех сигналов. Разумеется, необходимо хранить в памяти устройства защиты информацию о времени начала интервала Δt_1 и знаке тока в этот момент. Фаза одного из сигналов принимается равной нулю (опорный сигнал). Время отсчитывается с момента обнаружения неисправности.

Если условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$ выполняется для опорного сигнала и для сигнала, сдвиг по фазе которого нужно определить (т. е. оба ТТ насыщаются в ходе ПП), то цифровое устройство рассчитывает фазовый сдвиг $\Delta\phi$ по формуле

$$\Delta\phi = \omega\Delta T, \quad (1)$$

где ω – частота основной гармоники, [рад/с], ΔT – разница по времени между началом интервалов Δt_1 двух сравниваемых сигналов, [с]. Если два сравниваемых сигнала имеют разные знаки тока в моменты начала интервала Δt_1 , то к рассчитанному по формуле (1) значению прибавляется 180 эл. град.:

$$\Delta\phi = \omega\Delta T + 180. \quad (2)$$

Если условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$ выполняется только для одного из сравниваемых сигналов, а для другого сигнала значения Δt_1 и Δt_2 одинаковы (один из ТТ находится в состоянии насыщения), то $\Delta \varphi$ также определяется по формуле (1), а ΔT в этом случае показывает разницу во времени между началом интервала Δt_1 сигнала, для которого выполняется вышеописанное условие, и между пиковым значением второго сигнала того же знака, что и знак первого сигнала в момент начала Δt_1 .

При равенстве Δt_1 и Δt_2 для обоих сигналов ТТ работают без насыщения.

2. ПОСТАВЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Использование предложенного алгоритма рассмотрено на примере блока «генератор–трансформатор». Он включает в себя силовой трансформатор (СТ) типа ТДЦ-400000/220, к стороне низкого напряжения (НН) подключен синхронный генератор (СГ) ТВВ-320-2. На стороне НН установлены измерительные ТТ типа ТШ-20-12000/5, на стороне ВН использованы ТТ типа ТФНД-220-IV-2000/1. Номинальные параметры СГ следующие: номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}G = 375 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, номинальная активная мощность $P_{\text{ном}}G = 320 \text{ МВт}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}}G = 20 \text{ кВ}$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$, постоянная времени генератора $TaG = 0,388 \text{ с}$, реактивное сопротивление по продольной оси $X_d = 1,70 \text{ о.е.}$, переходное реактивное сопротивление по продольной оси $X_d'' = 0,173 \text{ о.е.}$

Номинальные параметры СТ следующие: номинальная полная мощность $S_{\text{номТ}} = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, номинальное напряжение обмотки ВН $U_{\text{ВНном}} = 242 \text{ кВ}$, номинальное напряжение обмотки НН $U_{\text{ННном}} = 20 \text{ кВ}$, напряжение КЗ $u_k = 11 \%$, мощность потерь КЗ $P_k = 880 \text{ кВт}$.

Параметры измерительных ТТ определены по данным [5] и по открытым данным заводов-изготовителей. Параметры ТШ-20-12000/5: номинальная нагрузка $Z_{\text{ном}} = 1,2 \text{ Ом}$, площадь поперечного сечения сердечника $Q = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, длина средней магнитной линии $l_{\text{ср}} = 2,59 \text{ м}$, число витков вторичной обмотки $w_2 = 2400$, активное сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 1,9 \text{ Ом}$. Точное значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки X_2 для данного ТТ не приводится в указанных выше источниках.

По данным [5], для ТТ класса напряжения 10...20 кВ, имеющих шинную конструкцию, сопротивление X_2 одного порядка с R_2 и несколько превышает его, поэтому в расчетах приближенно принято $X_2 = 2,0$ Ом.

Параметры ТФНД 220 IV 2000/1: $Z_{\text{ном}} = 50$ Ом, $Q = 30,5 \cdot 10^{-4}$ м², $I_{\text{ср}} = 1,55$ м, $w_2 = 2000$, $R_2 = 11,5$ Ом, $X_2 = 41,0$ Ом.

Приняты следующие параметры энергосистемы со стороны ВН: индуктивное сопротивление $X_c = 2,1$ Ом, номинальное напряжение $U_c = 220$ кВ, постоянная времени затухания апериодической слагающей тока КЗ $T_a = 0,2$ с. Это соответствует условиям работы электрической станции.

Токи ТТ определяются средствами математического моделирования в программном пакете Simulink. Структура модели исследуемого объекта представлена на рис. 2.

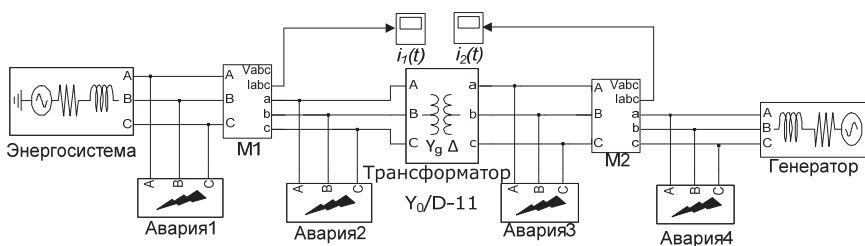


Рис. 2. Структура универсальной математической модели силового трансформатора (СТ) и его дифференциальной защиты в программном пакете Simulink для имитации внешних и внутренних КЗ на разных сторонах силового трансформатора

СТ с 11-й группой соединения обмоток моделируется с помощью элемента Three-Phase Transformer (Two Windings), СТ и энергосистема – с помощью элементов Three-Phase Source. Замер токов, протекающих от энергосистемы и от генератора, производится соответственно с помощью измерительных блоков M1 и M2 (элементы Three-Phase VI Measurement), подключенных к элементам типа Score. Переходные процессы в СТ приближенно учтены использованием при расчетах сверхпереходного сопротивления. Для получения вторичных токов используется математическая модель ТТ [7].

Рассмотрим порядок расчета фазового сдвига (фаза А). Отсчет фазового сдвига производится относительно вектора вторичного тока I_{2A} в обмотке ТТ, установленного в фазе А на стороне ВН СТ. Фаза тока I_{2A} равна нулю.

Для рассматриваемого повышающего СТ с 11-й группой соединения обмоток вектор тока плеча ДЗ в фазе А со стороны ВН $I_{\text{плВН}}$ формируется как

разность векторов I_{2A} и I_{2B} , где I_{2B} – вектор вторичного тока в обмотке ТТ, установленного в фазе В на стороне ВН СТ. Обозначим фазовый сдвиг между вторичными токами ТТ в фазах А и В на стороне ВН СТ как $\Delta\varphi_{AB}$.

Вектор $I_{плНН}$ обозначает ток плеча ДЗ со стороны НН СТ. Этот ток соответствует вторичному току ТТ, установленного на фазе А на стороне НН СТ. Вектор этого тока имеет значение фазы $\Delta\varphi_{Aa}$, где $\Delta\varphi_{Aa}$ – фазовый сдвиг между вторичными токами I_{2A} и $I_{плНН}$. Сдвиг между фазами токов плеч фазы А $\Delta\varphi_{dA}$ – разность фаз токов $I_{плВН}$ и $I_{плНН}$. При внешнем КЗ векторы токов плеч ДЗ $I_{плВН}$ и $I_{плНН}$ совпадают по фазе, и поэтому $\Delta\varphi_{dA}$ равен нулю.

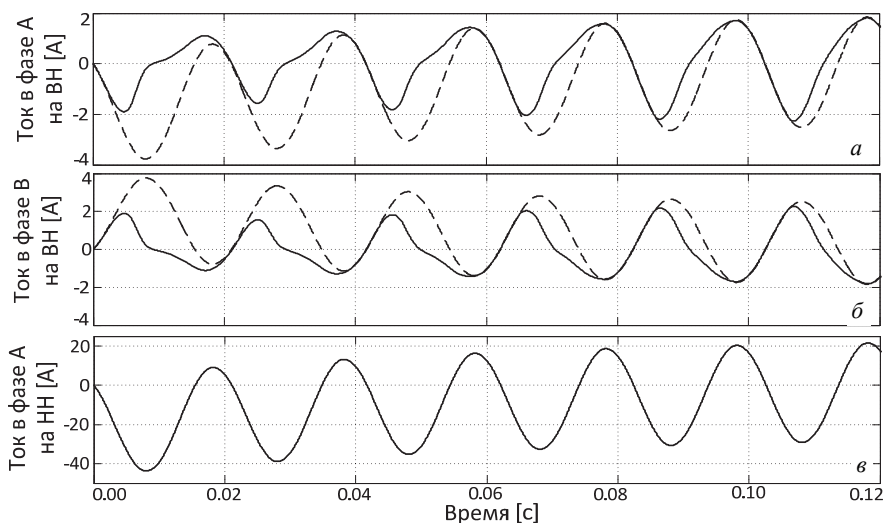


Рис. 3. Результаты моделирования внешнего двухфазного КЗ на стороне ВН силового трансформатора:

а – токи в обмотке ТТ на стороне ВН в фазе А (пунктирные линии – первичные токи, сплошные – вторичные токи); *б* – то же в фазе В; *в* – в обмотке ТТ на стороне НН в фазе А

Рассмотрим поведение защиты при внешнем двухфазном КЗ на стороне ВН СТ (заканчиваются фазы А и В) в условиях, когда энергосистема на стороне ВН отключена. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. Момент возникновения КЗ выбран таким, чтобы апериодическая составляющая была максимальной. Первичные и вторичные токи представлены на рис. 3.

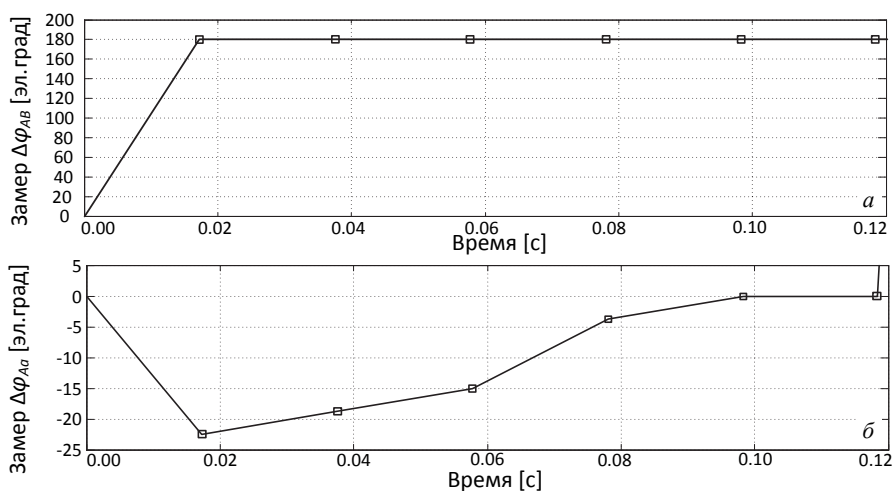


Рис. 4. Результаты измерения угла между фазами по предложенному методу:

a – измеренные значения $\Delta\varphi_{AB}$; *б* – измеренные значения $\Delta\varphi_{Aa}$

Даже при значительном насыщении ТТ погрешность замера сдвига фаз между вторичными токами не превышает 23 эл. град. (рис. 4). В конце первого периода значение $\Delta\varphi_{AB}$ равно 180 эл. град., значение $\Delta\varphi_{Aa}$ равно 22,5 эл. град. Тогда модуль $\Delta\varphi_{dA}$ в конце первого периода составляет 22,5 эл. град., в конце второго – 18,8 эл. град., в конце третьего – 15,0 эл. град. На рис. 5 показана векторная диаграмма для расчета $\Delta\varphi_{dA}$.

Определение значения $\Delta\varphi_{dA}$ для основной гармоники (при использовании цифрового преобразования Фурье) реализуется с помощью программного обеспечения, разработанного отечественным производителем ДЗ (рис. 6). Этот способ дает существенно большую погрешность: в конце первого периода рассчитанное значение модуля $\Delta\varphi_{dA}$ составляет приблизительно 54 эл. град., в конце второго периода – 41 эл. град., в конце третьего – 35 эл. град. Итак, несмотря на глубокое насыщение ТТ, погрешность определения фазового сдвига токов плеч ДЗ по предложенному в данной работе методу невелика.

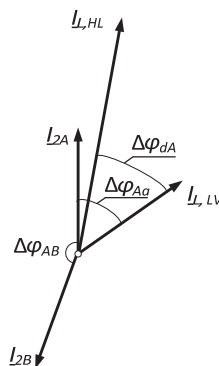


Рис. 5. Оценка значения $\Delta\varphi_{dA}$ по измерениям $\Delta\varphi_{AB}$ и $\Delta\varphi_{Aa}$

Как показали дальнейшие численные эксперименты, для надежной отстройки от погрешностей следует принимать угол блокировки равным приблизительно 30 эл. град.

При превышении измеренного фазового сдвига значения угла блокировки следует разрешить действие ДЗ.

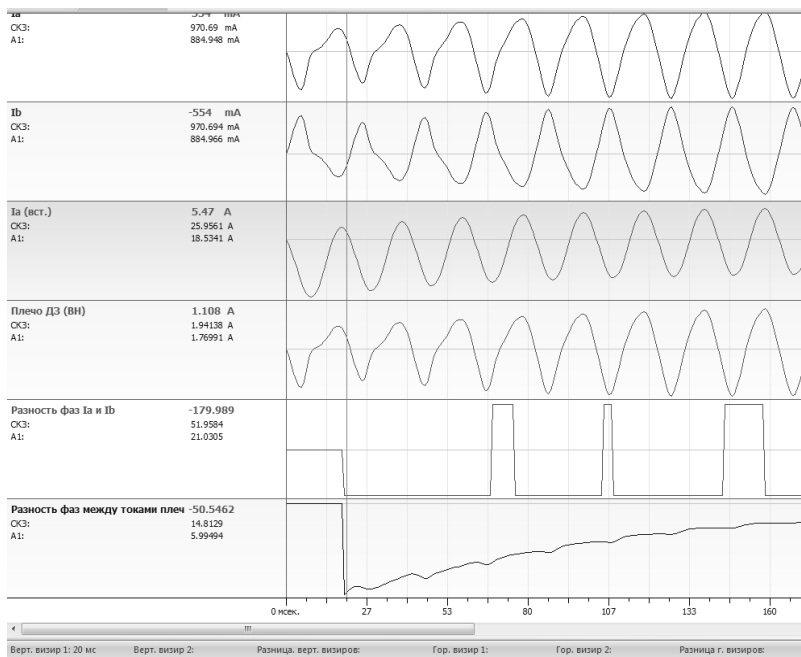


Рис. 6. Определение значения $\Delta\varphi_{dA}$ по данным программы FastView 4.3

Также было проведено сравнение точности исследуемого алгоритма с методом, реализуемым компанией Siemens в устройствах дифференциальной защиты для компенсации погрешности замера фазового сдвига. Суть метода заключается в «спрямлении» кривой тока, при этом параметры спрямленного сигнала зависят от времени входа ТТ в насыщение и подробнее описаны в [2]. На рис. 6 приведен пример работы такого алгоритма. Условия опыта задавались следующие: исходный сигнал (первый сигнал) подавался на ТТ, испытывающий насыщение в первом периоде ПП. Вторичный сигнал (второй сигнал) тока насыщенного ТТ был спрямлен по предложенной методике (третий сигнал), после чего произведен замер фазового сдвига приведенным первичным током и между вторичным и между первичным спрямленным током. Резуль-

таты работы алгоритма цифровой фильтрации приведены на четвертом и пятом сверху графике на рис. 6 соответственно.

Погрешность работы алгоритма, основанного на выявлении участков точной работы ТТ, не превышает 15 эл. град. в этих условиях.

Как было установлено, спрямление сигнала тока и последующая цифровая фильтрация способны значительно снизить погрешности замера (вплоть до 12 эл. град.). По этому показателю алгоритм фирмы Siemens работает точнее предложенного. Однако, как видно из рис. 6, возможны кратковременные «выбросы» замера фазового сдвига. Максимальная погрешность составила 25 эл. град. (см. рис. 6 на 34 мс).

Данные «выбросы» не свойственны алгоритму, предлагаемому в исследовании.

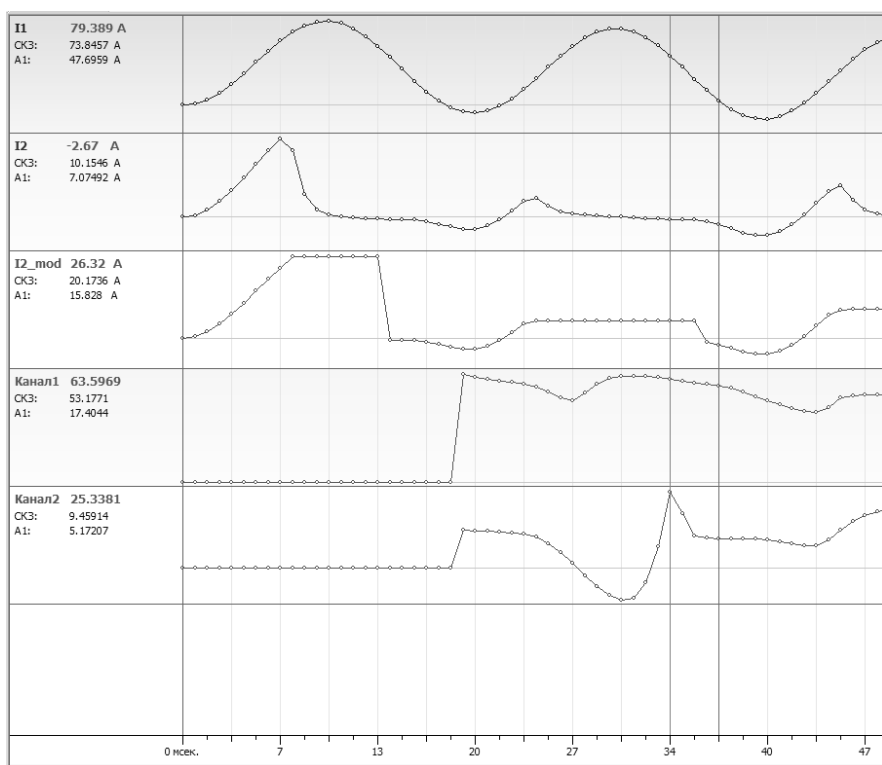


Рис. 7. Результаты измерения угла между фазами с применением метода, используемого в продукции компании Siemens

Перспективной представляется возможность комбинировать два рассмотренных способа замера, когда из двух результатов выбирается наименьший. Это позволяет использовать преимущества каждого метода в отдельности и нивелировать их недостатки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании интервалов идеальной трансформации ТТ алгоритм сравнения фаз более точен, чем метод цифровой фильтрации, который широко используется в микропроцессорных устройствах защиты, а также исключает необходимость расчета уставок для каждого конкретного объекта защиты. Предложенный алгоритм оперирует малым числом переменных, что повышает быстродействие цифрового устройства ДЗ.

При реализации предложенного алгоритма разработчиком конкретного устройства должна быть решена задача определения параметров срабатывания измерительных органов, реагирующих на абсолютные значения входных сигналов, их фаз и производных. Выбор этих параметров необходим для отстройки от влияния помех, однако этот выбор не требует какого-либо вмешательства проектного и эксплуатирующего персонала, что исключает человеческий фактор.

Разрабатываемый алгоритм может быть применен совместно с методом спрямления вторичных токов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты: принципы и область применения: пер. с англ. / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005. – 273 с.
2. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
3. Косых Д.А. Сравнение технических характеристик современных продольных дифференциальных токовых защит генераторов. Совершенствование релейной защиты // Энергетик. – 2009. – № 12. – С. 23–25.
4. Багинский Л.В. К выбору принципа работы быстродействующей защиты основных элементов электрических станций и подстанций // Электрические станции. – 1978. – № 5. – С. 41–45.
5. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.

6. *Кужесков С.Л., Синельников В.Я.* Защита шин электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.

7. *Глазырин В.Е., Торопов Г.Э.* Моделирование переходных процессов в группах трансформаторов тока // Сборник научных трудов НГТУ. – 2000. – № 3 (20). – С. 75–82.

Глазырин Владимир Евлампиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Автор более 130 научных работ. Область научной деятельности – разработка микропроцессорных реле защит и устройств автоматики для электрических станций и подстанций. E-mail: be@pst.power.nstu.ru

Литвинов Илья Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Автор более 40 научных работ. Область научной деятельности – разработка микропроцессорных реле защит и устройств автоматики для электрических станций и подстанций. E-mail: litvinov.2013@corp.nstu.ru

Наумова Александра Ивановна, студентка факультета энергетики (кафедра электрических станций) Новосибирского государственного технического университета; призер олимпиад по физике и теоретическим основам электротехники, участник финала конкурса статей на английском языке по темам 48-й сессии СИГРЭ в рамках Российской энергетической Недели в Москве. E-mail: naumova_sanya@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-206-219

The improving of sensitivity of differential-phase protection in case of deep saturation of current transformers*

V.E. Glazyrin¹, I.I. Litvinov², A.I. Naumova³

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, candidate of Technical Sciences, associate professor of the power plant department. E-mail: be@pst.power.nstu.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, candidate of Technical Sciences, assistant professor of the power plant department. E-mail: litvinov.2013@corp.nstu.ru

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the power plant department. E-mail: naumova_sanya@mail.ru

The article presents the example of power transformer differential protection where percentage restraint and phase comparison principles are combined. This method provides stable work of differential protections during current transformers saturation. The work of the algorithm is considered in terms of the power transformer differential protection with taking into account vector group of transformer. This way of phase comparison has a smaller probability of wrong operation in contrast to digital filtration that is often used in digital protection devices.

Keywords: relay protection; differential protection; power transformer; differential-phase protection; current transformers saturation

REFERENCES

1. Ziegler G. *Tsifrovyye ustroystva differentsial'noi zashchity: printsipy i oblast' primeneniya* [Digital devices of differential protection. principles and field of application]. Moscow, Energoizdat Publ., 2005. 273 p. (In Russian).
2. Shneerson E.M. *Tsifrovaya releinaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2007. 549 p.
3. Kosykh D.A. *Sravnenie tekhnicheskikh kharakteristik sovremennykh prodol'nykh differentsial'nykh tokovykh zashchit generatorov. Sovershenstvovanie releinoi zashchity* [Comparison of technical characteristics of modern longitudinal differential generator current protection. Improvement of relay protection]. *Energetik*, 2009, no. 12, pp. 23–25. (In Russian).
4. Baginskii L.V. *K vyboru printsiipa raboty bystrodeistvuyushchei zashchity osnovnykh elementov elektricheskikh stantsii i podstantsii* [Regarding the selection of the principle of operation of high-speed protection of basic elements of power

* Received 01 October 2019.

plants and substations]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 1978, no. 5, pp. 41–45.

5. Korolev E.P., Liberzon E.M. *Raschety dopustimyykh nagruzok v tokovykh tspeyakh releinoi zashchity* [Calculation of Permissible Loads in Relay Protection Circuits]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 208 p.

6. Kuzhekov S.L., Sinel'nikov V.Ya. *Zashchita shin elektrostantsii i podstantsii* [Protection of busbars of power plants and substations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 184 p.

7. Glazyrin V.E., Toropov G.E. *Modelirovanie perekhodnykh protsessov v gruppakh transformatorov toka* [Modeling transient phenomena in groups of current transformers]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2000, no. 3 (20), pp. 75–82.

Для цитирования:

Глазырин В.Е., Литвинов И.И., Наумова А.И. Повышение чувствительности дифференциально-фазной защиты в случае глубокого насыщения трансформаторов тока // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 206–219. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-206-219.

For citation:

Glazyrin V.E., Litvinov I.I., Naumova A.I. *Povyshenie chuvstvitel'nosti differentsial'no-faznoi zashchity v sluchae glubokogo nasyshcheniya transformatorov toka* [The improving of sensitivity of differential-phase protection in case of deep saturation of current transformers]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 206–219. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-206-219.