

О требованиях к трансформаторам тока и устройствам релейной защиты в переходных режимах при наличии апериодической составляющей в первичном токе

С. Л. КУЖЕКОВ, А. А. ДЕГТЯРЕВ, Б. Б. СЕРБИНОВСКИЙ
Южно-Российский Государственный Политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
ООО НПФ «КВАЗАР»
РОССИЯ
stanislavkuzhekov@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электромагнитный трансформатор тока, переходный режим, погрешность, стандарт, релейная защита, требования.

ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования является вопрос об учете повышенных погрешностей электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) в переходных режимах, в том числе, при неуспешном АПВ, синхронизации синхронных генераторов, а также при самозапуске и пуске мощных электродвигателей.

Проблема учета погрешностей трансформаторов тока неоднократно обсуждалась на совещаниях по ТТ, заседаниях научно-технической комиссии по внедрению новых устройств РЗА, на сессиях CIGRE, заседаниях технического комитета МЭК ТК 38 (измерительные трансформаторы), в научно-технической печати. Однако в России до сих пор не выработана единая позиция по указанному вопросу.

Существует мнение, что вероятность возникновения апериодических составляющих настолько мала, что учет погрешностей переходного режима экономически нецелесообразен. С другой стороны, в зарубежных стандартах, например, в [1] нормирована продолжительность интервала точной трансформации ТТ в переходном режиме значением 2 – 3 мс.

Исследования дифференциальных защит мощных электродвигателей, силовых трансформаторов собственных нужд и блоков генератор-трансформатор тепловых и атомных электростанций, а также анализ аварийных осциллограмм позволили установить четыре основных случая, при которых появляются апериодические составляющие.

— первые периоды процесса пуска или самозапуска ЭД ($3T_a > t > 0$, где T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока питающей сети). Начальное значение апериодической составляющей может достигать амплитуды тока пуска или самозапуска.

– Процесс успешного разгона ротора ЭД ($t_n > t > 3T_a$, где t_n – время пуска). Возникает низкочастотная составляющая переменной частоты, обусловленная свободным током ротора. Амплитуда этой составляющей может превышать номинальный ток.

– Неуспешное автоматическое повторное включение поврежденного элемента или включение на короткое замыкание, существовавшее в цепи.

– Внезапное КЗ в цепях объекта защиты.

В первых трех случаях ток коммутируется выключателем, скорость движения контактов которого выше скорости изменения принужденной периодической составляющей тока.

Пусть напряжение в сети изменяется по закону

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha) = U_m \sin \gamma,$$

где γ – фаза включения.

В пределах полупериода (из-за симметричности процесса допустимо рассмотреть полупериод) значения γ равновероятны, поэтому плотность распределения фазы включения

$$f(\gamma) = \frac{1}{\pi}, \text{ 1/рад.}$$

Значительные аperiodические составляющие ($I_{a.0} \geq \frac{\sqrt{3}}{2} I_{п.м}$, где $I_{п.м}$ – амплитуда периодической составляющей), имеют место в диапазоне

$$-\frac{\pi}{6} \leq \gamma \leq \frac{\pi}{6}.$$

Вероятность возникновения указанных составляющих

$$p\left(-\frac{\pi}{6} \leq \gamma \leq \frac{\pi}{6}\right) = \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} f(\gamma) d\gamma = \frac{1}{3},$$

т.е. достаточно велика.

Особую опасность представляет режим неуспешного АПВ, в котором остаточная индукция в магнитопроводе ТТ может достигать предельно возможного значения. В случае совпадения по знаку остаточной индукции и направления перемагничивания после включения выключателем тока КЗ возможно максимально быстрое насыщение магнитопровода ТТ.

В четвертом случае причиной КЗ могут быть удары молнии, попадание посторонних предметов, сближение токоведущих частей и др. Если скорость движения элементов, вызывающих КЗ, ниже скорости изменения периодической составляющей, то вероятность возникновения значительных аperiodических составляющих мала. При ударах молнии следует считаться с возможностью возникновения аperiodической составляющей, которая по статистике ФРГ в высоковольтных сетях 220 кВ возникает в 50% однофазных КЗ. Там же установлено усредненное значение $T_a = 0,085$ с.

В практике отмечены случаи неправильных срабатываний устройств дифференциальной защиты, параметры которых выбирались без учета переходных процессов. Например, на ряде АЭС имели место случаи неправильной работы дифференциальных защит пускорезервных трансформаторов собственных нужд при действии АВР. Для выяснения причины неправильной работы указанных защит ОРГРЭС и АТЭП были проведены испытания на АЭС, которые подтвердили реальность возникновения аperiodических составляющих в токах пускорезервных трансформаторов при самозапуске ЭД. Во всех опытах в токах возникали аperiodические составляющие. Наличие значительных сигналов небаланса защиты было обусловлено насыщением ТТ на стороне 6 кВ, при этом ТТ на стороне высшего напряжения (330 кВ) трансформировали ток практически без искажения.

На одной из ГРЭС были отмечены случаи неправильной работы дифференциальной защиты силовых трансформаторов блоков генератор-трансформатор и дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) ВЛ-330 кВ при неуспешном АПВ шин 330 кВ. В токах также наблюдались аperiodические составляющие, вызвавшие насыщение ТТ. Продолжительность бестоковой паузы во входном сигнале органа сравнения фаз составила 86° , что превысило угол блокировки защиты.

В настоящее время в ЕЭС России эксплуатируется большое количество электромагнитных трансформаторов тока с замкнутыми магнитопроводами, изготовленными из холоднокатаной электротехнической стали с высокой прямоугольностью характеристики намагничивания без ограничения остаточной индукции (ТТ). Уровень значения последней может превышать 50% индукции насыщения. В соответствии со стандартом МЭК 60044-6 (1992-03) такие ТТ относятся к классам TPX и TPS.

Расчет показывает, что интервал времени точной трансформации ТТ в наиболее неблагоприятных случаях (при наличии в первичном токе аperiodической составляющей и остаточной индукции неблагоприятного знака в магнитопроводе) может составлять 2–3 мс, что приводит к появлению значительных токов небаланса продольных дифференциальных защит сборных шин, генераторов, силовых трансформаторов, блоков генератор – трансформатор, автотрансформаторов и мощных электродвигателей, сравнимых по уровню с током внешнего короткого замыкания. В результате возможны неселективные действия указанных дифференциальных и дифференциально-фазных защит. Кроме того, могут иметь место замедления в срабатывании дистанционных и направленных защит.

Сказанное позволяет сделать вывод, что учет влияния повышенных погрешностей ТТ в переходных режимах на работу устройств РЗА является актуальным вопросом, требующим решения.

Существо предложения.

Обеспечение правильного функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах может быть достигнуто двумя способами.

1. Разработка усовершенствованных алгоритмов функционирования цифровых устройств релейной защиты (ЦУРЗ) с анализом режима на интервале точной трансформации (2 – 3 мс) и подтверждением сохранения анализируемого режима на интервале насыщенного состояния магнитопровода ТТ.

2. Разработка усовершенствованных ТТ (электромагнитных ТТ, оптико-электронных преобразователей тока, преобразователей тока на базе пояса Роговского и др.).

Реализация второго способа возможна, в частности, путем усовершенствования серийно выпускаемых ТТ путем использования магнитопроводов, изготовленных из новых магнитных материалов, например, обладающих свойством безгистерезисного намагничивания. Указанные материалы освоены в производстве промышленностью. При усовершенствовании ТТ возможны различные варианты, например, составной магнитопровод (холоднокатаная сталь и распределенный зазор), на базе которого может быть создан помехоустойчивый цифровой преобразователь тока.

Благодаря указанному достоинству усовершенствованных электромагнитных ТТ, можно обеспечить эффективное функционирования существующих устройств РЗА, реализованных с помощью различной элементной базы, а также с помощью дополнительных элементов обеспечить требования к ТТ по ширине диапазона токов (работа при токах нагрузки и КЗ), что важно для АСТУ.

В рамках данной работы рассматривается только первый способ обеспечения правильного функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах.

Первый способ не требует существенных капиталовложений и может быть реализован на практике производителями ЦУРЗ при наличии в технических заданиях требований на проведение соответствующих доработок. При этом должны быть нормированы погрешности ТТ в переходных режимах и значения остаточных токов на интервале насыщенного состояния магнитопроводов ТТ. Должны быть также нормированы параметры токов для испытаний ЦУРЗ в переходных режимах с корректным учетом погрешностей ТТ.

Известен ряд алгоритмов восстановления первичного тока ТТ при насыщении магнитопровода численными методами по выборкам вторичного тока, в которых выполняется поиск участков достаточно точной трансформации первичного тока ТТ и на данных интервалах формируются выходные результаты (амплитуда и фаза первичного тока). При этом отсчеты вторичного тока, не попадающие в указанные интервалы, в дальнейшем не используются.

Длительность интервала достоверной трансформации ТТ на первых периодах переходного процесса колеблется в пределах 2 – 5 мс, что составляет 15 – 25 % от длительности периода тока частотой 50 Гц. Таким образом, в течение 15 – 18 мс за период при насыщении магнитопровода ТТ в устройствах релейной защиты информация о первичном токе фактически отсутствует.

Возможны режимы работы электрооборудования электростанций, когда в фазных токах возникает аperiodическая составляющая с текущими значениями, превышающими амплитудные значения изменяющейся основной гармоники. При этом ТТ могут находиться в режиме насыщения несколько периодов указанной гармоники. Например, на рис. 1 приведена реальная осциллограмма несинхронного включения блока генератор-трансформатор мощностью 160 МВт.

Из осциллограммы, представленной на рис. 1, видно, что аperiodическая составляющая в токах фаз В и С ТТ в цепи статора турбогенератора более чем в два раза превышает амплитуду основной гармоники, поэтому кривые токов в течение 60 мс располагаются над осью времени. После 60 мс ТТ фаз В и С насыщаются и находятся в данном режиме в течение нескольких периодов. При этом участки достаточно точной трансформации ТТ отсутствуют на протяжении 90 мс. В то же время токи ТТ на стороне высшего напряжения силового трансформатора блока турбогенератор – трансформатор трансформировались практически без искажений.

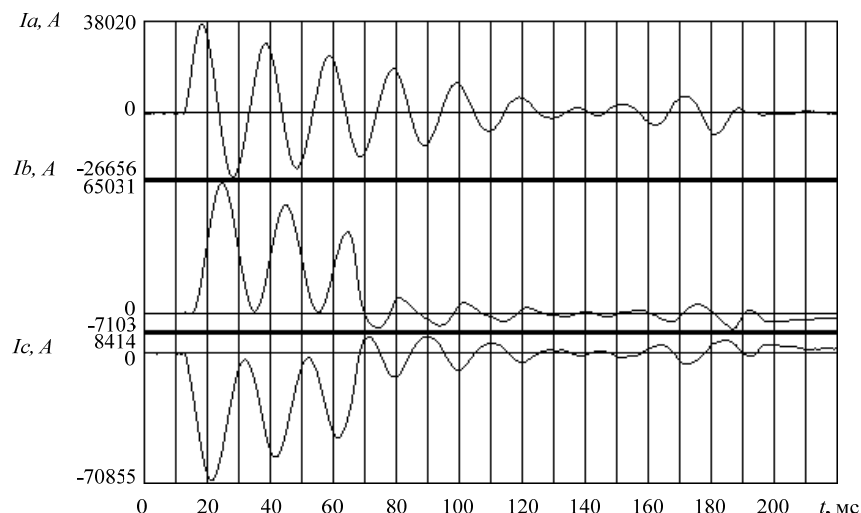


Рис. 1: Осциллограмма вторичных токов ТТ при несинхронном включении турбогенератора

В рассмотренной ситуации отмеченные выше алгоритмы восстановления первичного тока, а, соответственно, и реализующие их устройства релейной защиты, не работоспособны. Указанное явление привело к неправильному срабатыванию продольной дифференциальной защиты блока турбогенератор – трансформатор.

Таким образом, для обеспечения правильной работы релейной защиты не достаточно использования информации о режиме на интервале времени точной трансформации ТТ. Должны быть также нормированы в переходных режимах значения остаточных токов на интервале насыщенного состояния магнитопроводов ТТ с целью своевременного распознавания изменения режима работы защищаемого объекта или системы, например, перехода КЗ вне зоны действия в зону действия и наоборот. Должны быть также нормированы параметры токов для испытаний ЦУРЗ в переходных режимах с корректным учетом погрешностей ТТ.

Восстановление основной гармоники первичного тока в зоне насыщения магнитопровода трансформатора тока.

Сущность метода восстановления первичного тока ТТ в зоне насыщения магнитопровода (при СХН - аппроксимации кривой намагничивания, т.е. при замене последней спрямленной характеристикой) заключается в вычислении по выборкам вторичного тока дискретных значений намагничивающего тока и, соответственно, приведенного ко вторичной цепи ТТ первичного тока. Возможность компенсации погрешностей ТТ можно пояснить рассмотрением работы ТТ с СХН, схема замещения которого приведена на рис. 2. На интервале точной трансформации ТТ ключ К разомкнут, а в насыщенном состоянии – замкнут.

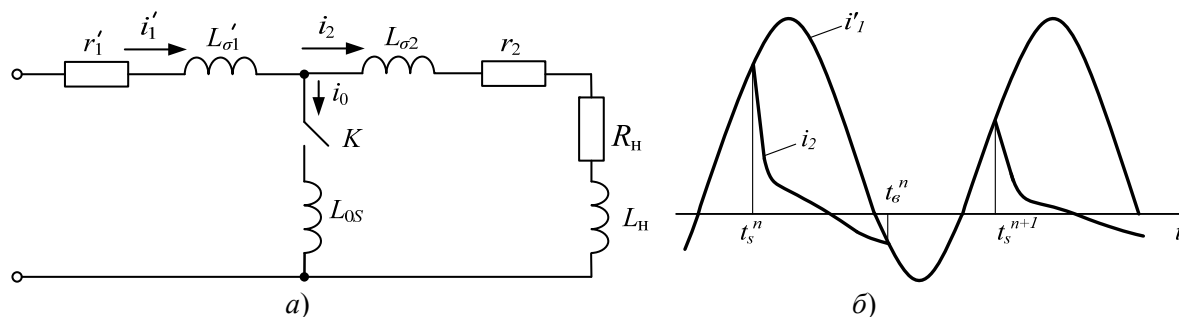


Рис. 2: Схема замещения ТТ (а); кривые токов ТТ с СХН в переходном режиме (б)

Выражения для мгновенных значений вторичного и намагничивающего токов ТТ с СХН при синусоидальном первичном токе и активном характере вторичной цепи в интервале, когда ТТ насыщен ($t_s^n < t < t_s^{n+1}$), имеют следующий вид

$$i_2 = \frac{\omega L_{0s}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{0s}^2}} I'_{m1} \sin(\omega t + \arctg \frac{1}{\omega T_2}) + A_2 \exp(-\frac{t-t_s^n}{T_2}); \quad (1)$$

$$i_0 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{0s}^2}} I'_{m1} \sin(\omega t - \arctg \omega T_2) - A_2 \exp(-\frac{t-t_s^n}{T_2}), \quad (2)$$

где A_2 – амплитуда экспоненциальной составляющей, возникающей вследствие насыщения сердечника;

$$T_2 - \text{постоянная времени вторичной цепи, } T_2 = \frac{L_{0s}}{R_2};$$

R_2 – активное сопротивление вторичной цепи, примем в соответствии с рис. 2 $R_2 = r_2 + R_n$;

L_{0s} – индуктивность ветви намагничивания на насыщенном участке СХН.

Таким образом, по известному вторичному току ТТ с СХН, вычислив амплитуду и фазу периодической составляющей этого тока, зная R_2 и L_{0s} , можно найти амплитуду и фазу намагничивающего и приведенного первичного токов.

Аналогичным образом можно показать возможность компенсации погрешностей ТТ с СХН и при другом известном характере нагрузки, а также в переходном режиме КЗ.

Возможность достаточно точной для целей микропроцессорных защит компенсации погрешностей ТТ определяется с помощью критерия применимости СХН: $\Theta \leq 20$, где $\Theta = z_2/x_{0s}$, а z_2 и x_{0s} представляют собой полное сопротивление вторичной цепи и индуктивное сопротивление намагничивающей ветви ТТ в насыщенной части характеристики, соответственно. Следует отметить также, что аппроксимация характеристики намагничивания с помощью СХН обеспечивает достаточную точность восстановления сигнала в переходном режиме при значении обобщенного параметра $A_z < 3$.

Предложены три варианта реализации алгоритма восстановления периодической составляющей первичного тока ТТ в зоне насыщения магнитопровода при активном характере вторичной цепи ($L_{\sigma 2} = L_n = 0$ рис. 2, а) и наличии в подводимом токе свободной аperiodической и принужденной периодической составляющей основной частоты. Разработка указанных алгоритмов производится в два этапа. На первом этапе не учитываются аperiodические составляющие во вторичном и намагничивающем токах, обусловленные насыщением магнитопровода ТТ.

1. Путем несложных преобразований из (1) и (2) можно получить следующее выражение:

$$i_0 = i_2 \cdot \frac{R_2}{\omega L_{0s}} \cdot \operatorname{tg}(\omega t - \arctg \omega T_2). \quad (3)$$

Тангенс является функцией, неопределенной для аргументов, принимающих значения из ряда $\alpha = \pi n/2$ при $n = 1, 2 \dots \infty$, кроме того, имеет большую производную (скачок) в окрестностях данных значений аргумента. Таким образом, для выражения (3) необходимо ввести следующее ограничение:

$$i_{0,i} = i_{0,i-1} \text{ при } \frac{1}{\omega} \left(\pi n - \arctg \frac{1}{\omega T_2} \right) - \Delta t < t_i < \frac{1}{\omega} \left(\pi n - \arctg \frac{1}{\omega T_2} \right) + \Delta t, \quad (4)$$

где $t_i = i h$; $i = 0, 1 \dots \infty$;

h – шаг дискретизации вторичного тока;

$2\Delta t$ – интервал, на котором наблюдается «скачок» i_0 , определяемого выражением (3);

$n = 0, 1 \dots \infty$.

Выражение (3) с учетом ограничения (4) позволяет по выборкам вторичного тока получить дискретные значения намагничивающего тока. Мгновенное значение приведенного первичного тока определяется следующим образом:

$$i'_1 = i_2 + i_0. \quad (5)$$

При активном характере вторичной цепи намагничивающий ток i_0 отличается от вторичного тока i_2 :

– амплитудой в $\frac{R_2}{\omega L_{0s}}$ раз (согласно (1) и (2));

– фазой – отстает на $\pi/2$ (согласно схеме замещения на рис. 2, а при $L_{\sigma 2} = L_n = 0$).

Используя данное замечание, можно получить выражения для двух следующих алгоритмов.

2. Основой второго алгоритма восстановления первичного тока является следующий способ получения мгновенных значений намагничивающего тока:

$$i_0 = i_2 \left(t - \frac{T}{4} \right) \cdot \frac{R_2}{\omega L_{0s}} \quad (6)$$

где $T = 0,02$.

Как следует из выражения (6), при использовании данного алгоритма получение текущего значения приведённого первичного тока возможно с задержкой $t_d \geq 5$ мс.

3. Третий алгоритм восстановления первичного тока основан на численном дифференцировании вторичного тока. Мгновенные значения намагничивающего тока могут быть получены как

$$i_0 = - \frac{R_2}{\omega \cdot x_{0s}} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (7)$$

Выражения (3), (6), (7) справедливы для одиночного ТТ. В случае соединения фазных ТТ по схеме звезда с нулем или в треугольник рассматриваемые алгоритмы применимы лишь при симметричной схеме включения и одновременном насыщении всех ТТ.

Для проверки работоспособности приведенных алгоритмов и определения качественных характеристик каждого из них были разработаны и опробованы их математические модели в системе Simulink пакета MatLab. За основу была взята схема замещения ТТ с СХН при активном характере вторичной цепи (рис. 2, а). В качестве объекта исследования был принят трансформатор тока ТШВ-15 (6000/5).

Для исследования возможностей разработанных алгоритмов в математической модели имитируется режим несинхронного включения блока генератор-трансформатор. Режим соответствует осциллограмме, приведенной на рис. 1. Форма первичного тока получена путем аппроксимации тока фазы В на указанной осциллограмме:

$$F_{cn1}(t_i) = 33000 \exp(-t_i/0.1) \sin(t_i 314) + 37000 \exp(-t_i/0.1). \quad (8)$$

Для оценки работоспособности рассмотренных алгоритмов используются следующие характеристики:

– длительность переходного режима восстановления $t_{п.р.}$. Под $t_{п.р.}$ понимается интервал времени от первого момента распознавания насыщения ТТ до момента, когда начнет выполняться следующее неравенство:

$$\left| \frac{i_{1в,i} - i'_{1и}}{i'_{1и}} \right| < 0,1, \quad (9)$$

где $i_{1в,i}$, $i'_{1и}$ – мгновенные значения восстановленного и реального приведенных первичных токов соответственно; $i = 0, 1 \dots \infty$;

– полная погрешность за период тока при условии равенства нулю аperiodической составляющей, вызванной насыщением магнитопровода ТТ (погрешность в установившемся режиме алгоритма восстановления):

$$\varepsilon_{уст} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (i'_{1и} - i_{1в,i})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (i'_{1и})^2}} 100\%, \quad (10)$$

где $N = \frac{T}{h}$ – число дискретных отсчетов приведенного первичного тока за период $T=0,02$ с;

h – шаг дискретизации приведенного первичного вторичного тока;

– полная погрешность в переходном режиме восстановления приведенного первичного тока $\varepsilon_{пр}$ (при наличии аperiodической составляющей, вызванной насыщением магнитопровода ТТ). Данная погрешность вычисляется в соответствии с выражением (10) при $N = \frac{t_{пр}}{h}$;

– кривая изменения приведенной относительной погрешности восстановления приведенного первичного тока Δ_i на временном интервале $(t_s; t_s+0,02)$. Значения Δ соответствуют выражению

$$\Delta_i = \left| \frac{i_{1в,i} - i'_{1i}}{I_{1m}} \right|,$$

где I_{1m} – амплитуда периодической составляющей первичного тока.

Результаты моделирования трех рассмотренных алгоритмов показывают, что длительность временных отрезков после насыщения магнитопровода ТТ, на которых восстановленный первичный ток имеет погрешность более 10 %, для всех трех алгоритмов колеблется в широких пределах 2,1 – 14,5 мс. Погрешность $\varepsilon_{пр}$ первого алгоритма обусловлена наличием в расчетном намагничивающем токе интервалов, на которых в соответствии с ограничением (4) $i_0 = \text{const}$.

Для второго алгоритма основной вклад в погрешность $\varepsilon_{пр}$ вносит равенство нулю намагничивающего тока на начальном после насыщения временном отрезке длительностью 5 мс, а значение $\varepsilon_{уст}$ в большей степени определяется аperiodической составляющей в первичном токе.

Не трудно показать, что полные погрешности $\varepsilon_{пр}$ и $\varepsilon_{уст}$ третьего алгоритма в значительной степени зависят от скорости затухания основной гармоники первичного тока – полная погрешность увеличивается с уменьшением значения постоянной времени T_n .

Кроме индивидуальных особенностей каждого из рассмотренных алгоритмов восстановления первичного тока существенное влияние на их точность оказывает величина постоянной времени (T_2) аperiodической составляющей, возникающей при насыщении магнитопровода ТТ. Данная постоянная времени (как отмечалось выше) определяется величиной сопротивления нагрузки и характеристиками конкретного ТТ.

Результаты моделирования рассмотренных алгоритмов при увеличенном значении индуктивности ветви намагничивания до значения $L_{ос} = 0,019$ мГн и, соответственно, увеличенном $T_2 \approx 16$ мс ($\Theta \approx 5$) показали, что максимальная длительность временного отрезка, на котором восстановленный первичный ток имеет погрешность более 10 %, составила 28 мс, что существенно превышает значение, полученное при $L_{ос} = 0,003$ мГн. Кроме того, полные погрешности в установившихся режимах алгоритмов восстановления $\varepsilon_{уст}$ не зависят от фазы первичного тока, при которой происходит насыщение ТТ.

Итерационный алгоритм компенсации аperiodической составляющей в выборках вторичного тока.

Разработанный алгоритм выполняется в два этапа.

1. На первом этапе определяются параметры компенсируемой экспоненциальной составляющей. Пусть указанная составляющая имеет следующий вид:

$$i_{\text{exp},i} = A_0 \cdot e^{-t_i/T_0},$$

где A_0 – значение экспоненты в первый момент времени после насыщения магнитопровода ТТ;

T_0 – постоянная времени данной экспоненты. Значение T_0 известно и равно T_2 .

Для определения A_0 можно использовать любой численный метод, позволяющий определить значение частоты (f) дискретного сигнала по нескольким последовательным выборкам при условии, что $f \ll 1/h$, где h – шаг дискретизации. В данной работе использован алгоритм, предложенный в [5], в соответствии с которым для определения частоты дискретного сигнала достаточно четырех последовательных выборок.

2. На втором этапе выполняется компенсация аperiodической составляющей для каждой последующей выборки вторичного тока

$$i_{2,ij} = i_{2,i} - A_{0,j} \cdot e^{-t_i/T_2}.$$

Применение итерационного алгоритма отстройки от аperiodической составляющей, вызванной насыщением ТТ, позволило существенно уменьшить длительность переходного процесса для первого и второго алгоритмов восстановления первичного тока. Оставшиеся скачки значений $t_{пр}$ в рассмотренных алгоритмах связаны с их индивидуальными особенностями, изложенными выше.

Для наглядности результатов восстановления первичного тока на осциллограмме рис. 4 из кривой 1 исключена аperiodическая составляющая.

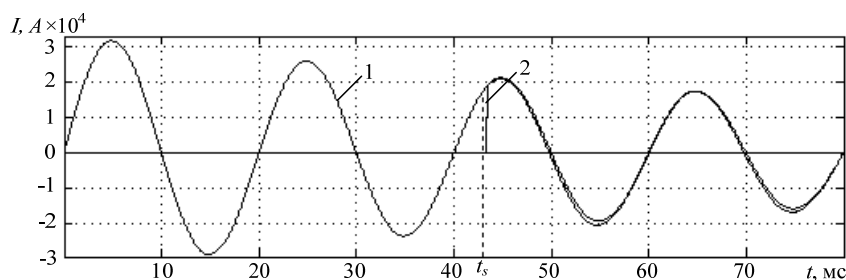


Рис. 3: Результаты моделирования третьего алгоритма восстановления первичного тока (с компенсацией апериодической составляющей):
1 – первичный ток; 2 – восстановленный первичный ток

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя всё изложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Необходимо стандартизовать продолжительность интервала точной трансформации электромагнитных ТТ в переходных режимах, а также уровень остаточной трансформации на интервале насыщенного состояния ТТ, например, значение принужденной периодической составляющей первичного тока.

2. В переходных режимах с насыщением ТТ целесообразно применять быстродействующие алгоритмы восстановления первичного тока на интервале насыщенного состояния магнитопровода.

3. Предложены три алгоритма восстановления первичного тока ТТ в зоне насыщенного состояния магнитопровода при наличии в первичном токе апериодической составляющей, базирующиеся на особенностях трансформации вторичного тока ТТ с СХН при активной нагрузке вторичной цепи.

4. Предложены критерии точности восстановления первичного тока ТТ в зоне насыщенного состояния магнитопровода:

- длительность переходного режима восстановления первичного тока;
- полная среднеквадратичная погрешность за период тока;
- полная среднеквадратичная погрешность на интервале переходного режима восстановления первичного тока;
- приведенная относительная погрешность восстановления первичного тока.

5. Предложен алгоритм компенсации свободной апериодической составляющей тока во вторичной цепи ТТ, обусловленной его насыщением.

6. Сравнительный анализ предложенных алгоритмов восстановления первичного тока с учетом вышеуказанного алгоритма компенсации свободной составляющей тока показал, что наиболее эффективным из них по четырем предложенным критериям является алгоритм, основанный на численном дифференцировании вторичного тока.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – Перевод с англ. / Под ред. Дьякова А.Ф. – М.: Знак. 2008. – 216 с.

[2]. Кужеков С.Л., Сербиновский Б.Б. Выделение основной гармоники сигнала трансформатора тока в режиме насыщения. – СПб.: ОЭЭП РАН, 2003. – 39 с.