

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме повышения точности измерительной информации, получаемой в электрической сети. Наибольшая погрешность наблюдается в токах, получаемых с помощью измерительных трансформаторов тока (ТТ), работающих на электромагнитном принципе. Объясняется это процессом насыщения сердечника ТТ при протекании в первичной обмотке больших токов КЗ, при переключениях и бросках тока намагничивания. Процесс насыщения может начаться как в первых периодах, так и в последующих периодах переходного процесса. В статье приведен обзор методов повышения достоверности информации, получаемой от ТТ в переходных и установившихся режимах. Рассмотрены методы, основанные на использовании искаженного вторичного тока, характеристики намагничивания магнитопровода ТТ и магнитного потока, соответствующего началу процесса насыщения в сердечнике ТТ. Выявлена степень проработанности существующих методов и показаны их достоинства и недостатки. В начале статьи выполнена систематизация существующих методов на основе классических и современных подходов. Классический подход характеризуется применением оптимизации абсолютной магнитной проницаемости сердечника. В современных методах восстановления вторичного тока используются методы математического моделирования с применением характеристики намагничивания и с прогнозированием мгновенных значений искаженного сигнала. Далее приводятся результаты апробации наиболее эффективных из современных методов и их сравнительный анализ. В процессе апробации определена точность восстановления тока с частотой дискретизации, соответствующей стандарту МЭК 61850 – 80 отсчетов на период промышленной частоты. В заключении были сделаны выводы о целесообразности использования рассмотренных методов и предлагаются направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: трансформаторы тока (ТТ), вторичный ток, насыщение сердечника ТТ, намагничивающий ток, характеристика намагничивания.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных источников информации об электрической сети являются ТТ, работающие на электромагнитном принципе. Для повышения точности измерений ТТ был произведен ряд конструктивных изменений как магнитной системы, так и электрической части [1-3].

Как показывает опыт эксплуатации, при превышении предельно допустимых значений тока на первичной стороне возникают искажения измерительной информации, вызванные насыщением сердечника ТТ, вследствие чего погрешность выходит за допустимые пределы [4, 5]. Как правило, на этапе проектирования и реализации для компенсации этой погрешности выполняется витковая коррекция [5].

В целях избежания отрицательного влияния насыщения ТТ на работу релейной защиты (РЗ) на этапе проектирования систем РЗ с абсолютной селективностью часто используется тормозная характеристика, позволяющая повысить эффективность работы системы. Отсутствие универсального технического решения, обеспечивающего эффективное восстановление искаженного сигнала, полученного в переходном режиме, приводит к необходимости поиска новых решений для устранения таких недостатков.

В настоящее время в электроэнергетике большое внимание уделяется развитию технологий «цифровой подстанции», выполняющихся в рамках стандарта МЭК 61850 – «Сети и системы связи на подстанциях» [6, 7]. Достоинства стандарта заключаются в повышении эффективности построения вторичной системы на подстанциях – сокращения количества контрольных кабелей более чем в 3 раза, отсутствия необходимости использования громоздких кабельных лотков и функ-

циональная совместимость микропроцессорных устройств различных производителей [8].

В процессе своего развития микропроцессорные устройства (МПУ) значительно улучшили свои функциональные возможности. Современные МПУ позволяют интегрировать системы релейной защиты и автоматики (РЗА) с системой управления электрической сети [9, 10]. В настоящее время одним из важных вопросов РЗ является централизованная релейная защита и автоматика (ЦРЗА), реализуемая, в основном, на цифровых подстанциях [6, 7]. Однако как для ЦРЗА, так и для традиционной РЗА степень достоверности информации по току является одним из первостепенных факторов.

В настоящей работе рассматривается поведение вторичного тока в переходных режимах, выполнен обзор классических методов, основанных на схемотехнических решениях [1-3] и современных методов с применением математического моделирования [11-23]. Также выявлена степень проработанности рассматриваемых методов для решения проблем, связанных с насыщением сердечника ТТ.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ТТ

По теме компенсации погрешности ТТ выполнено большое количество исследований. Изначально исследования посвящались повышению эффективности измерения при степени загрузки ТТ ниже номинального режима [1-3]. Существующие на сегодняшний день методы можно разделить на две основные части: классические и современные (рис. 1). К классическим методам можно отнести те разработки, которые исследовались до появления и активного применения в электроэнергетике МПУ. И соответственно, к современным методам относятся разработки, исследованные при активном применении МПУ.

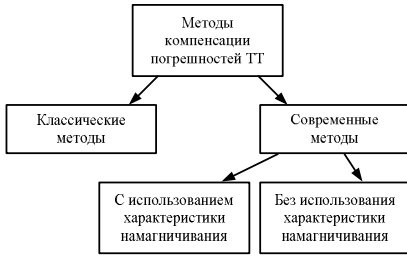


Рис. 1. Классификация методов компенсации погрешностей ТТ

Классические методы были направлены на оптимизацию магнитной системы ТТ, что частично сохранились и в современных методах [1-3]. Однако при появлении МПУ стало возможным применять методы, активно использующие математические модели.

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ (ВОССТАНОВЛЕНИЯ)
ВТОРИЧНОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Рассматриваемые в работах [1-3] способы основаны на повышении абсолютной магнитной проницаемости μ_a сердечника ТТ, которые путем изменения магнитной индукции B позволяют удерживать μ_a в ее оптимальных значениях (рис. 2, зона б). Из этого рисунка также видно, что при малых или больших значениях индукции μ_a низкая, вследствие чего происходит рост токовой погрешности ТТ (рис. 2, зоны а, с).

С точки зрения магнитного явления токовую погрешность ТТ можно представить в виде (1). Из выражения видно, что она обратно пропорционально μ_a :

$$f_{in} = \frac{0,225 I_2 z_2 I_m}{\sqrt{2} \mu_a S_m f w_{2n} F_1} \sin(\psi + \alpha) \cdot 100, \quad (1)$$

где I_m – средняя длина магнитного потока в магнитопроводе, м; z_2 – полное сопротивление вторичной цепи и вторичной обмотки, Ом; f – частота переменного тока, Гц; S_m – действительное сечение магнитопровода, м²; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; w_{2n} – номинальное число вторичных витков; F_1 – первичная МДС, А; ψ – угол потерь; α – угол между вторичным I_2 и вторичной ЭДС E_2 , град.

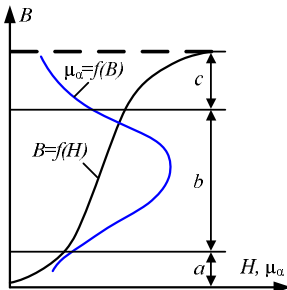


Рис. 2. Зависимость $B=f(H)$ и $\mu_a=f(B)$

Каждый из предложенных методов имеет свои достоинства. Однако данные методы не учитывают компенсацию токовой погрешности при больших кратностях первичного тока и в переходном режиме.

В [13, 16, 18] рассматриваются методы компенсации погрешностей ТТ, построенные на основе определения мгновенных значений намагничивающего и вторичного токов в режиме насыщения (2), (2а), (2б) использовании тригонометрических функций (3), применении численного дифференцирования вторичного тока (4) и вычислении намагничивающего тока по смещенным на $T/4$ отсчетам вторичного тока (5). В [13, 16] предлагается метод для уменьшения влияния погрешностей ТТ на работу дифференциальной защиты, который, по мнению авторов, считается одним из наиболее эффективных, затем в [17, 18] производится анализ методов, предложенных в [13, 16] с новыми разработанными методами.

В первом методе используются выражения (2), (2а), (2б) описывающие мгновенное значение вторичного и намагничивающего токов для насыщенного участка при синусоидальной форме первичного тока для модели ТТ со спрямленной характеристики намагничивания (СХН), имеющие следующий вид:

$$a = b \cdot ci_2 = \frac{\omega L_0}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_0^2}} I_{m1}' \times \times \sin \left(\omega t + \arctg \left(\frac{1}{\omega T_2} \right) \right) + + A_2 \exp \left(-\frac{t - t_s^n}{T_2} \right), \quad (2)$$

$$i_2 = \frac{\omega L_0}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_0^2}} I_{m1}' \times \times \sin \left(\omega t + \arctg \left(\frac{1}{\omega T_2} \right) \right) + + A_2 \exp \left(-\frac{t - t_s^n}{T_2} \right), \quad (2a)$$

$$i_1' = i_2 + i_0, \quad (2б)$$

где i_1' , i_2 , i_0 – мгновенные значения первичного, вторичного и соответственно намагничивающего токов ТТ; R_2 , L_0 – нагрузка вторичной цепи и индуктивность намагничивания; ω – циклическая частота; I_{m1}' – амплитуда первичного тока КЗ; T_2 – постоянная времени вторичной цепи, $T_2 = R_2/L_0$; A_2 – амплитуда аперiodической составляющей, возникающая вследствие насыщения сердечника; t_s^n – начальный момент насыщения.

По известному току i_2 можно получить его амплитуду и фазу, а по R_2 и L_0 амплитуду и фазу тока i_0 . При сложении этих токов получится восстановленный ток i_1' на вторичной стороне (2б).

Во втором методе для нахождения намагничивающего тока i_0 используется выражение (3), а для определения восстановленного тока i_1' – (2б):

$$i_0 = i_2 \frac{R_2}{\omega \cdot L_0} \operatorname{tg}(\omega t - \arctg(\omega T_2)). \quad (3)$$

Основой третьего метода является численное дифференцирование вторичного тока i_2 . Намагничивающий ток i_0 определяется по (4), а восстановленный ток i_1 по (26):

$$i_0 = -\frac{R_2}{\omega x_0} \cdot \frac{di_2}{dt}. \quad (4)$$

Принцип работы четвёртого метода заключается в вычислении намагничивающего тока i_0 по смещенным на $T/4$ отсчетам периодической составляющей вторичного тока:

$$i_0 = i_2 \left(t - \frac{T}{4} \right) \cdot \frac{R_2}{\omega L_0}. \quad (5)$$

После вычисления намагничивающего тока i_2 по (26) определяется восстановленный ток i_1 .

Среди предложенных методов наиболее эффективным является алгоритм численного дифференцирования вторичного тока [18]. К достоинствам этого метода относится относительно небольшое количество вычислений, а основным недостатком является его зависимость от параметров магнитопровода ТТ, которые имеют различные значения при разных переходных режимах и разной остаточной (рабочей) магнитной индукции [13,16]. Также при глубоком насыщении вторичного тока предложенный метод не способен восстановить ток i_2 , так как после возникновения насыщения ток i_2 стремится к нулю.

В [19, 20] авторами был предложен метод восстановления вторичного тока, затем метод, позволяющий производить детектирование начала процесса насыщения [21] и в последующей работе, объединяются и модернизируются эти методы [22]. В данных методах для детектирования используется производная вторичного тока i_2 , а для вычисления тока i_0 характеристика, представленная на **рис. 3**. По (6) производится обнаружение насыщения сердечника ТТ с использованием разностной функции del_2 :

$$\operatorname{del}_2 = i_2(k+1) - 2i_2(k) + i_{2e}(k-1), \quad (6)$$

где k – дискретное время; i_{2e} – прогнозируемый вторичный ток, который получается путем экстраполяции измеренного в интервале правильной трансформации (ИПТ) вторичного тока i_2 :

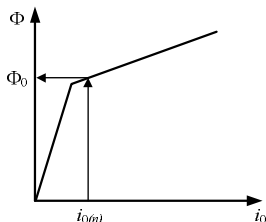


Рис. 3. Зависимость $i_0=f(\Phi)$

Затем согласно (7) при известном магнитном потоке $\Phi(t_0)$, соответствующем началу насыщения сердечника ТТ, можно вычислить магнитный поток $\Phi(t)$, после этого с использованием зависимости $i_0=f(\Phi)$, полученную на основе измерений или справочных данных, можно определить намагничивающий ток i_0 :

$$\begin{aligned} \Psi(t) &\equiv w_2 [\Phi(t) - \Phi(t_0)] = \\ &= \int_{t_0}^t i_2(\lambda) d\lambda + L_2 [i_2(t) - i_2(t_0)]. \end{aligned} \quad (7)$$

По (8) определяется магнитный поток $\Phi(t_0)$ и после определения намагничивающего тока по (26) выполняется расчет восстановленного тока i_1 :

$$\Phi(t_0) = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{\Phi}(t_0 + k\Delta T), \quad (8)$$

где N – количество отсчетов в период; ΔT – интервал дискретизации.

Преимущество предложенного метода заключается в быстром и простом детектировании насыщения сердечника ТТ. Однако магнитная система ТТ от партии к партии имеет заметные различия, поэтому восстановление тока с использованием априорно заданных характеристик намагничивания не обеспечивает высокую точность. Более того, восстановление вторичного тока с использованием характеристики, близкой к прямоугольной характеристике намагничивания (ПХН) ТТ, приводит к большим погрешностям.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ТОКА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

В [11,12] используется алгоритм, основанный на (10), в котором для получения неискаженного вторичного тока сначала рассчитывается i_0 , который затем добавляется к измеренному току i_2 . Процесс вычисления начинается при возникновении насыщения магнитопровода, для определения этого момента используется процедура сегментации – разграничения интервалов правильной и искаженной трансформации.

На **рис. 4** представлена схема замещения ТТ, для данной схемы справедливо следующее уравнение:

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (9)$$

В соответствии с [11,12] ток i_0 можно определить по выражению (10). После вычисления тока i_0 по выражению (26) определяется восстановленный вторичный ток i_1 :

$$i_0(k) = (\gamma + \theta) i_2(k) + (\gamma + \theta) i_2(k-1) + i_0(k-1), \quad (10)$$

где γ и θ – вспомогательные коэффициенты, заменяющие параметры ТТ (R_2 , L_2 , L_m) и определяются следующим образом:

$$\gamma = \frac{R_2 \Delta t}{2L_0}, \quad (11)$$

$$\theta = \frac{L_2}{L_0}. \quad (12)$$

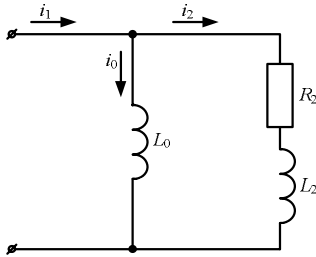


Рис. 4. Схема замещения ТТ

Преимуществом данного метода является небольшое количество коэффициентов в уравнениях, что позволяет сократить количество измерений и упростить систему уравнений. Главным недостатком предложенного метода является его невысокая точность, т.к. при КЗ, вызывающем насыщение магнитопровода ТТ, погрешность может достигать 20% [12].

В [14, 15] рассматривается метод, который обеспечивает восстановление вторичного тока ТТ на насыщенном участке с помощью процедуры прогнозирования. Данный метод основывается на ИПТ, который позволяет получить четыре основных параметра входного тока: амплитуду A и B , постоянную времени первичного тока T_1 и начальный угол φ (формула 13). Для прогнозирования искаженной части вторичного тока ТТ достаточно получить три отсчета на ИПТ, после чего составляется система трансцендентных уравнений, решая которую получим значения A , B , T_1 и φ . Подставив затем полученные результаты в (13), можно определить ток на насыщенном участке:

$$i_1(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (13)$$

Используя формулу преобразования сумм тригонометрических функции и ряд Тейлора, выражение (13) можно переписать следующим образом:

$$i_1(t) = I_m \cos(\varphi) \sin(\omega t) + I_m \sin(\varphi) \cos(\omega t) - \frac{t}{T_1} I_m + I_m. \quad (13a)$$

Известно, что при глубоком насыщении ИПТ сжимается до 2–3 мс [13]. Согласно стандарту МЭК 61850 на таком ИПТ можно получить достаточное количество отсчетов для решения трансцендентных уравнений [6, 7]. Получив достоверные отсчеты, затем по (136) можно определить неизвестные коэффициенты $(C_1 - C_4)$.

$$i_1(t) = C_1 \sin(\omega t) + C_2 \cos(\omega t) - C_3 t + C_4. \quad (136)$$

Преимущество такого подхода заключается в повышенной точности при известной форме первичного тока. Однако в ходе апробации данного алгоритма выявлено, что изменение T_1 в сторону уменьшения приводит к большим погрешностям восстановленного тока, вследствие чего интервал точного прогнозирования будет уменьшаться.

В работах [23] предложен алгоритм разностной функции, который позволяет производить искусственное расширение ИПТ. Предложенный метод основан на том предположении, что приращение вторичного тока в ИПТ между отсчетами одинаковое. Таким образом, используя несколько отсчетов ИПТ, можно прогнозировать следующий отсчет вне этой зоны. Для наиболее точного прогнозирования авторы предлагают следующую формулу:

$$i_2(k) = 4i_2(k-1) - 6i_2(k-2) + 4i_2(k-3) - i_2(k-4). \quad (14)$$

К достоинству предложенного метода можно отнести высокую точность восстановленных отсчетов i_1' на коротком интервале прогнозирования и простоту определения начала процесса насыщения ТТ. Однако погрешность этого метода прямо пропорциональна количеству прогнозируемых отсчетов, вследствие чего количество отсчетов i_1' ограничено.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ

В настоящем разделе рассматриваются результаты апробации рассмотренных ранее современных алгоритмов [11, 12, 14, 15, 17–23] в среде Matlab с использованием математической модели ТТ, предложенной в [24]. Характеристика намагничивания модели ТТ близка к ПХН [4]. В данной модели используется ТТ ТФНД – 110М со следующими параметрами: $R_2=3,7$ Ом, $L_2=3,566$ мГн, $n_T=800/5$ и $S=17,75 \cdot 10^{-4}$ м² [25]. Форма первичного тока i_1 при КЗ описывается следующей формулой:

$$i_1(t) = 45000 \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right) + 47000e^{-\frac{t}{0.1}}. \quad (15)$$

Поскольку предложенный в [17,18] метод не способен восстанавливать искаженный вторичный ток ТТ с характеристикой намагничивания, близкой к ПХН, то используется модель ТТ с СХН. В модель закладывается ТПЛ–10К со следующими параметрами: $R_2=1$ Ом, $L_2=1,0828$ мГн, $n_T=300/5$ и $S=12,75 \cdot 10^{-4}$ м² [25]. Форма входного сигнала описывается следующим выражением:

$$i_1(t) = 13200e^{-\frac{t}{0.1}} \sin(314t) + 14800e^{-\frac{t}{0.1}}. \quad (16)$$

На рис. 5 представлена осциллограмма токов модели ТТ с СХН. Линия 1 соответствует первичному току (16), а линия 2 – вторичному току.

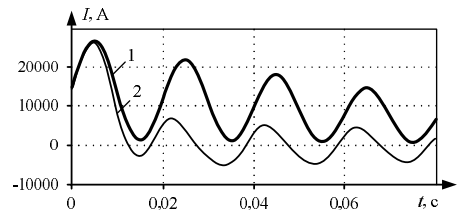


Рис. 5. Осциллограмма токов ТТ с СХН

Далее приводятся результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов с использованием численного моделирования.

На **рис. 6** представлен результат работы метода, рассматриваемого в [11,12]. Сплошная линия 1 соответствует приведенному ко вторичной цепи первичному току, сплошная линия 2 – искаженному вследствие насыщения вторичному току, а пунктирная линия 3 – восстановленному току.

Результат восстановления вторичного тока с помощью метода, предложенного в работах [14,15], представлен на **рис. 7**. Из осциллограммы видно, что в ИПТ (сплошная линия 2) присутствуют отсчеты, которых достаточно для решения уравнений (14), (15). В момент времени 4,5 мс начинается искажение вторичного тока i_2 относительно приведенного ко вторичной цепи первичного тока (сплошная линия 1). Алгоритм обнаруживает начало этого участка и запускает процесс восстановления (пунктирная линия 3).

Результат восстановления вторичного тока с помощью метода, предложенного в работах [17,18], представлен на **рис. 8**. Пунктирная линия 1 соответствует приведенному ко вторичной цепи первичному току, а сплошная линия 2 – периодическому восстановленному току.

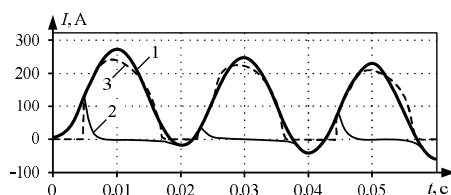


Рис. 6. Восстановление вторичного тока методом [11, 12]

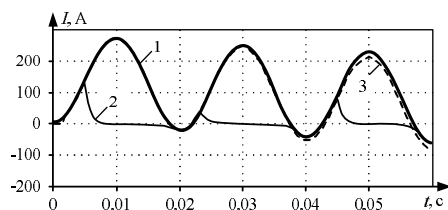


Рис. 7. Восстановление вторичного тока методом [14, 15]

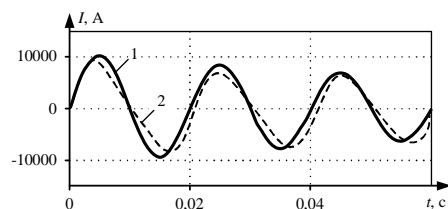


Рис. 8. Восстановление вторичного тока методом [17, 18]

На **рис. 9** представлен результат работы алгоритма, предложенного в работах [20, 22]. На этом рисунке сплошные линии 1 и 2 соответствуют приведенному к вторичной цепи первичному току и, соответственно, измеренному вторичному току, а пунктирная линия 3 – восстановленному току. Как видно из рисунка, после КЗ в магнитопроводе ТТ повышается индукция, вызывающая искажение вторичного тока. После обнаружения роста индукции происходит запуск алгоритма, и по зависимости $i_0=f(\Phi)$ (см. **рис. 3**), которая получается на базе вольт-амперной характеристики [21], отыскивается намагничивающий ток i_0 , который складывается с искаженными отсчетами вторичного тока i_2 .

Результат аппроксимации метода, предложенного в [23], показан на **рис. 10**. Как видно из осциллограммы, после начала искажения вторичного тока (сплошная линия 2) от приведенного ко вторичной цепи первичного тока (сплошная жирная линия 1) происходит частичное восстановление тока (пунктирная линия 3). Из данного графика хорошо видно, что зона точной экстраполяции меняется в зависимости от ширины ИПТ.

В **таблице** приведено сравнение рассмотренных ранее методов с различными подходами к восстановлению вторичного тока, для каждого из них определена токовая f_i и полная погрешность ε [5] восстановленного тока на интервале моделирования (6 мс). Необходимо отметить, что токовая погрешность f_i вторичного тока моделируемого сигнала i_2 без использования методов компенсации при насыщении сердечника составляет порядка 70–80%.

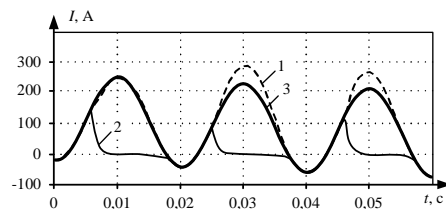


Рис. 9. Восстановление вторичного тока методом [20, 22]

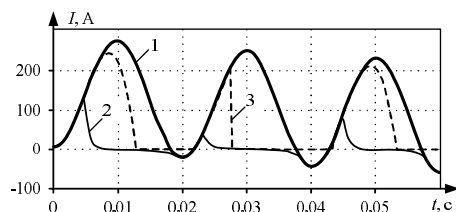


Рис. 10. Расширение ИПТ методом [24]

Сравнительная таблица методов восстановления вторичного тока в режиме насыщения сердечника ТТ

Источник	Подход	Достоинства и недостатки	f_i , %	ε , %
[11-12]	На основе вторичного тока без использования характеристики намагничивания	(+) Небольшое количество коэффициентов позволяет сократить ИПТ (-) Невысокая точность	4,9	22,3
[14,15]		(+) Высокая точность (-) При длительном переходном процессе будет возрастать погрешность	3	8,77
[23]*		(+) Обладает высокой точностью при небольшом расширении ИПТ (-) Не обладает способностью полностью восстановить искаженный ток	31,7	77,9
[17-18]	На основе определения индукции и индуктивности намагничивания с использованием характеристики намагничивания	(+) Небольшое количество вычисления (-) При глубоком насыщении не способен восстановить искаженный ток	9,8	30,3
[20,22]		(+) Способность восстанавливать искаженный сигнал независимо от степени насыщения сердечника (-) Зависимость от точности используемой характеристики намагничивания	-13,5	7,9

*Метод предназначен только для расширения ИПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе выполнен обзор существующих методов восстановления вторичного тока при КЗ с содержанием в первичном токе апериодической составляющей. Выявлена степень проработанности методов повышения точности измерения вторичного тока в электрических сетях. Определены достоинства и недостатки существующих методов.

2. Погрешность ТТ в режимах КЗ выходит за пределы ее допустимости (10%), вследствие чего происходит отбраковка передаваемых данных, влияющая на правильную работу РЗА. В связи с этим при разработке алгоритмов, закладываемых в современных МПУ, должна быть предусмотрена компенсация искажений тока в режиме насыщения сердечника ТТ.

3. Отсутствие универсального технического решения приводит к необходимости поиска новых подходов, способных компенсировать искажения вторичного тока как в установившихся, так и в переходных режимах. Для решения этой проблемы предлагается рассмотреть разработку алгоритмов, использующих избыточность получаемой информации для повышения точности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трансформаторы тока : учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, Л.В. Жалалис, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. Ленинград : Энергия, 1980. 344 с.
2. Трансформаторы тока : учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. 416 с.
3. Бачурин Н.И. Трансформаторы тока : учеб. пособие / Н.И. Бачурин. Москва: Энергия, 1964. 376 с.
4. Кужиков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанций и подстанции : учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1983. 184 с.
5. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «Институт Энергосетьпроект».
6. Status on the First IEC 61850 Based Protection and Control, Multi-Vendor Project in the United States / The Grid Modernization Journal, №8, 2007.

7. Case Studies. IEC 61850 at work / ABB Review Special Report, № 8, 2010.
8. C. Wong. IEC 61850 Next Gen Substation Automation / Materials of the Emerging Technology Roundtable – Substation Automation/IEC 61850. USA, 2016.
9. Иванов С.В., Буров А.В. Централизованная релейная защита подстанции 110/35/6 кВ на принципах системной интеграции алгоритмов защит в едином устройстве [Электронный ресурс] // Электроэнергия. Передача и распределения. 2017. №5.
10. WG K15 Report – Centralized substation protection and control, 2015.
11. Атишкин А.Б. Коррекция вторичного тока при насыщении измерительных трансформаторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://relematika.ru/images/news/Корректор%20тока.pdf>
12. Атишкин А.Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Нижегородский гос. техн. ун-т. Чебоксары, 2019. 24 с.
13. Кужиков С.Л. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока // Известия вузов. Электромеханика. 2009. №4. С. 12-18.
14. Jiuping P. An efficient compensation algorithm for CT saturation effects [Electronic source] / IEEE Transactions on power delivery. 2004. №19. P. 1623-1628.
15. Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока КЗ при насыщении ТТ [Электронный ресурс] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения. 2016. № 5. С. 55-65. Режим доступа: <https://ezprokhu.ufrfu.ru:3054/item.asp?id=30489960>
16. Кужиков С.Л. О способах уменьшения влияния погрешностей ТТ в переходных режимах на работу релейной защиты электроэнергетических систем [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем РЗА энергосистем. 2009. С. 99-104.
17. Дегтярев А.А. Автоматизированный контроль состояния трансформаторов тока высокого и сверхвысокого напряжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук 02.14.02 / Южно-Российский гос. техн. ун-т. Новочеркасск, 2011. 16 с.
18. Кужиков С.Л., Дегтярев А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока ТТ в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. №3. С. 29-31.
19. Kang Y.C., Kang S.H., Park J.K., Johns A.T., Aggarwal R.K. Development and hardware implementation of a com-

- pensating algorithm for the secondary current of current transformers [Electronic source] // IEEE Proc. Electr. Power appl. 1996. No.143. P. 41-49.
20. Kang Y.C. Park J.K., Kang S.H., Johns A.T., Aggarwal R.K. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 1997. No.12. P. 116-122.
 21. Kang Y. An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-derivative function [Electronic source] / Y. Kang, S. Kang, P. Crossley // IEEE Bologna PowerTech Conf. 2003. P. 320-326.
 22. Kang Y.Ch., Ui J.L., Sang H.K., Crossley P. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 2004. №19. P. 1642-1649.
 23. Wiszniewski A., Rebizant W., Schiel L. Correction of current transformer transient performers [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 2008. №23. P. 624-632.
 24. Петелин С. Модель однофазного трансформатора тока с насыщением [Электронный ресурс] // Цифровая подстанция. Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/>
 25. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчет допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: Энергия, 1980. 208 с.

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SURVEY OF DATA RELIABILITY IN DIGITAL SUBSTATION

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

Pavel V. Murzin

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: p.v.murzin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1593-9833>.

Ismoil N. Odinaev

Postgraduate Student, Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: ismoil.odinaev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2434-1929>.

Faridun Z. Bobokalonov

Master's Degree Student, Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: faridun.94@iist.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8740-0303>.

At present, great attention is paid to the problem of improving the accuracy of measurement information received in the electrical networks. The highest error is observed in currents obtained using instrumental electromagnetic current transformers (CT). It takes place due to CT saturation core during transient states including fault in the primary, costumer commutations and magnetizing-current inrush. The saturation process can start in the first cycle or in the following cycles of transient state.

The article represents literature analysis of increasing data reliability received from CT during both transient state and steady-state mode. The techniques based on usage of distorted secondary current, CT core magnetization curve and magnetic flux according to start of saturation process in the CT magnetic system. The sophistication of existing methods was revealed and their advantages and disadvantages are showed.

In the beginning of the paper, the systematization of existing methods was performed on the basis of classical and modern methods. Classical methods are characterized using optimization of core absolute permeability. Modern techniques of secondary current compensation make use of the mathematic modeling using curve magnetization and prediction of the transient values of the distorted signal. Further, testing results of more effective existing techniques and their comparison analysis are performed. During testing, the accuracy of secondary current compensation is determined with sampling rate according to IEC 61 850 standard i.e. 80 samples per cycle of commercial frequency (4 kHz). In conclusion, the appropriateness of making use of the

described techniques was proved and future work in this direction was proposed.

Keywords: current transformer (CT), secondary current, CT core saturation, magnetizing current, magnetization curve.

REFERENCES

1. Afanasiev V.V., Adoniev N.M., Kibel V.M., Sirota I.M., Stognij B.S. Transformatory toka [Current transformers]. Leningrad: Energy, 1989. 419 p. (In Russian)
2. Afanasiev V.V., Adoniev N.M., Zhalalis L.V., Sirota I.M., Stognij B.S. Transformatory toka [Current transformers]. Leningrad: Energy, 1980. 344 p. (In Russian)
3. Bachurin N.I. Transformatory toka [Current transformers]. Moscow: Energy, 1964. 376 p. (In Russian)
4. Kuzhekov S.L. Zashhita shin jelektrostantsii i podstantsii [Busbar protection]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 184 p. (In Russian)
5. RD 153-34.0-35.301-2002. Instrukcija po proverke transformatorov toka, ispolzuemyh v shemah relejnoj zashhity i izmerenija [Instruction for checking CT used in protective relay schemes]. OJSC «Firma ORGRJeS» and OJSC «Power Grid Planning Institute». (In Russian)
6. Status on the First IEC 61850 Based Protection and Control, Multi-Vendor Project in the United States / The Grid Modernization Journal, no. 8, 2007.
7. Case Studies. IEC 61850 at work / ABB Review Special Report, no. 8, 2010.

8. C. Wong. IEC 61850 Next Gen Substation Automation / Materials of the Emerging Technology Roundtable – Substation Automation/IEC 61850. USA, 2016.
9. Ivanov S. V., Burov A. V. Centralized substation protection 110/35/10 kV based on principles of system integration of protection algorithms in a single device. *Elektroenergija. Peredacha i raspredelenija* [Electricity. Transmission and distribution], 2017, no. 5. (In Russian)
10. WG K15 Report – Centralized substation protection and control, 2015.
11. Atnishkin A.B. Secondary current correction during instrument transformer saturation. <https://relematika.ru/images/news/Koppekrop%20roka.pdf>
12. Atnishkin A.B. Adaptivnye modifikatsii algoritma differentsial'noj zashchity transformatora. Avtoref. Kand. Diss. [Adaptive modifications of the differential protection algorithm of the transformer. Abstract of Ph.D. Diss.]. Cheboksary, 2019, 24 p.
13. Kuzhekov S.L. Providing the correct operation of microprocessor differential protection device. *Izvestija vuzov. Elektromekhanika* [News of Higher Educational Institutions. Electrician], 2009, no. 4, pp. 12-18. (In Russian)
14. Jiuping P. An efficient compensation algorithm for CT saturation effects [Electronic source] // IEEE Transactions on power delivery, 2004, no. 19, pp. 1623-1628.
15. Rybalkin A.D., Shurupov. A.A., Ermolkin I.A. Prediction on short current during CT saturation. *Tsifrovaja elektrotehnika, problemy i dostizhenija* [Digital electrical engineering. Challenges and achievements], 2016, no. 5, pp. 55-56. (In Russian)
16. Kuzhekov S.L., Degtjarev A. A. About reducing influence of CT errors on the relay protection operation of electrical power systems. *Sovremennye napravlenija razvitiya sistem RZiA energosistem* [Modern trends in development of electrical systems protection], 2009, pp. 99-104. (In Russian)
17. Degtjarev A. A. Avtomatizirovannyj kontrol sostojanija transformatorov toka vysokogo i sverhvyssokogo naprjazhenija. Avtoref. Kand. Diss. [Automated control of the state of high and extra high voltage CT. Thesis of a Ph.D. Diss.]. Novocherkassk, 2011. 16 p. (In Russian)
18. Kuzhekov S.L., Degtjarev A. A. On the correction of the periodic component of the CT primary current during transition mode. *Izvestija vuzov Elektromekhanika* [News of Higher Educational Institutions. Electrician], 2011, no. 3, pp. 29-31. (In Russian)
19. Kang Y.C., Kang S.H., Park J.K., Johns A.T., Aggarwal R.K. Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers [Electronic source] // IEEE Proc. Electr. Power appl. 1996, no. 143, pp. 41-49.
20. Kang Y.C., Park J.K., Kang S.H., Johns A.T., Aggarwal R.K. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 1997, no. 12, pp. 116-122.
21. Kang Y., Kang S., Crossley P. An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-derivative function [Electronic source] // IEEE Bologna PowerTech Conf. 2003, pp. 320-326.
22. Kang Y. Ch., Ui J.L., Sang H.K., Crossley P. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 2004, no. 19, pp. 1642-1649.
23. Wiszniewski A., Rebizant W., Schiel L. Correction of current transformer transient performers [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 2008, no. 23, pp. 624-632.
24. Petelin S. Singl phase CT model with saturation. *Cifrovaja podstancija* [Digital substation], <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/>
25. Korolev E.P., Liberzon Je.M. Raschet dopustimyh nagruzok v tokovyh tsepjah relennoj zashchity [Calculation of loadability in the current circuits of relay protection]. Moscow: Energy, 1980, 208 p. (In Russian)

Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции / А.В. Паздерин, П.В. Мурзин, И.Н. Одинаев, Ф.З. Бобокалонов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11)

Pazderin A.V., Murzin P.V., Odinaev I.N., Bobokalonov F.Z. Survey of Data Reliability in Digital Substation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11)