

Одинаев И.Н.<sup>1</sup>, Мурзин П.В.<sup>1</sup>, Паздерин А.В.<sup>1</sup>, Тащилин В.А.<sup>1</sup>, Шукало А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>АО «Электропренос-Электроприенос БиХ», ад Бая Лука, Босния и Герцеговина

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ

В качестве датчиков тока на электроэнергетических объектах в разное время использовались различные устройства, среди которых наиболее широкое распространение получили измерительные электромагнитные трансформаторы тока (ТТ). Применение измерительных ТТ оправдывается их сравнительно низкой стоимостью и достаточным уровнем надежности при условии соблюдения правил эксплуатации. Точность и достоверность измерений, полученных с помощью измерительных ТТ, являются необходимыми факторами для корректной работы систем релейной защиты и автоматики (РЗА), систем сбора данных и передачи информации и автоматизированных систем управления технологическими процессами в электроэнергетических объектах. В настоящей работе выполнена систематизация и произведен сравнительный анализ современных математических методов восстановления измерений ТТ в условиях насыщения на основе численного моделирования. В результате была выявлена устойчивость методов к степени зашумленности сигнала, остаточной намагниченности в сердечнике ТТ и начальной фазы тока КЗ, а также рассчитана точность восстановления тока. Сравнение выполнялось с изменением параметров исходного сигнала и уровня остаточной намагниченности ТТ. Выявлена эффективность работы методов на основе реального тока КЗ. В процессе апробации методов в качестве исходных данных был использован модельный сигнал, содержащий синусоидальную и апериодическую составляющие, а также сигнал, полученный при КЗ на реальном объекте. На основе апробации и сравнительного анализа рассмотренных методов сделаны основные выводы, описывающие достоинства и недостатки методов, а также предложены перспективные направления для дальнейшей работы по восстановлению искаженного вторичного тока ТТ.

**Ключевые слова:** трансформаторы тока, искаженный вторичный ток, характеристика намагничивания, восстановленный ток, намагничивающий ток, интервал правильной трансформации.

### ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный контроль режимов энергетических объектов, обеспечение надежности работы устройств РЗА, коммерческий и технический учет электроэнергии являются основными задачами, направленными на повышения эффективности электроснабжения. Качественное решение этих задач напрямую зависит от степени достоверности входной информации – тока и напряжения. В качестве датчиков тока используются различные устройства, среди которых наиболее широкое распространение и практическое применение получили ТТ, работающие на электромагнитном принципе [1]. Однако опыт эксплуатации показывает, что в режимах перегрузки и в режимах короткого замыкания (КЗ) сердечники таких ТТ насыщаются, вследствие чего происходит существенное искажение измеряемой информации, что приводит к излишнему срабатыванию или недопустимому замедлению в срабатывании систем РЗА. Как правило, для уменьшения насыщения сердечника в режимах, вызывающих смещение рабочей точки на кривой намагничивания ТТ в зону насыщения, предлагаются различные методы, основанные на конструктивных изменениях ТТ [2] и использовании цифровой обработки сигналов (ЦОС) [3–12]. Данные методы базируются на применении характеристик намагничивания ТТ и методов прогнозирования.

Для исключения ложного срабатывания устройств РЗА при насыщении ТТ в защитах, работающих по дифференциальному принципу, используются тормоз-

ные характеристики [13]. Однако, как показывает опыт эксплуатации, наличие насыщения в ТТ все еще влияет на работу РЗА, в результате чего происходит некорректное срабатывание [14,15]. Например, на воздушной линии 110 кВ «Пыть-Ях» ПП 110 кВ «Угутский» произошло двукратное отключение КЗ. После этого при однофазном КЗ на этой же линии неселективно сработала дифференциальная защита шин (ДЗШ) командой на отключение 1 и 2 системы шин 110 кВ. Согласно [16] причиной неселективного срабатывания ДЗШ послужила остаточная намагниченность в сердечниках ТТ ВЛ «Пыть-Ях» и ТТ шиносоединительно-го выключателя, появившаяся после КЗ.

Требования к ТТ для трансформации тока в переходном режиме определяются стандартом IEC 60044-6. Согласно этому стандарту, в зависимости от конструкции сердечника различают четыре класса ТТ: TPX, TPY и TPZ. В трансформаторах тока класса TPX воздушный зазор отсутствует, благодаря чему остаточная магнитная индукция в них может достигать своего предельного значения и сохраняться длительное время. Для снижения остаточной магнитной индукции сердечники ТТ класса TPY и TPZ изготавливаются с воздушным зазором. Таким образом, остаточная магнитная индукция в ТТ класса TPY не превышает 10% от своего предельного значения, а в ТТ класса TPZ пренебрежимо мала. Большинство ТТ, установленных в ЭЭС России, можно отнести к классу TPX (класс P согласно стандарту IEC 60044-1), погрешность которого в переходных режимах может достигать недопустимых значений.

Вышеперечисленные факторы свидетельствуют о необходимости снижения погрешности при измерении

искаженного вторичного тока на насыщенных участках или поиска других методов, способных обеспечить корректную работу устройств РЗА при насыщении ТТ.

В настоящей работе выполнен анализ ряда современных методов восстановления искаженного вторичного тока, основанных на применении ЦОС, не рассмотренных ранее в [17]. Выявлена чувствительность этих методов к переходному режиму КЗ на основе реальных данных, а также исследована их устойчивость к различным режимам насыщения.

КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕННОГО ВТОРИЧНОГО ТОКА

По теме компенсации вторичного тока ТТ было выполнено большое количество исследований [3–12]. Для компенсации погрешности ТТ, возникающей как при значительных перегрузках, связанных с подключением потребителей большой мощности или возникновением КЗ, так и в режимах с малыми токами, предлагались различные методы, описание которых приводится ниже. Для наглядности на рис. 1 представлена систематизация этих методов.

Классические методы [2] были разработаны и предложены до появления и активного применения в электроэнергетике микропроцессорных устройств (МПУ). Более подробное описание этих методов рассмотрено в [17].

Современные методы были предложены, в основном, после начала активного использования в электроэнергетике МПУ и основаны на применении ЦОС. К таким методам можно отнести восстановление тока с помощью характеристики намагничивания, путем прогнозирования вторичного тока ТТ, а также комбинированные методы восстановления тока. Анализ достоинств и недостатков методов первой и частично второй группы приведен в [17]. В данной статье более подробно рассмотрены комбинированные методы и некоторые из методов прогнозирования восстановления тока, не вошедшие в [17].

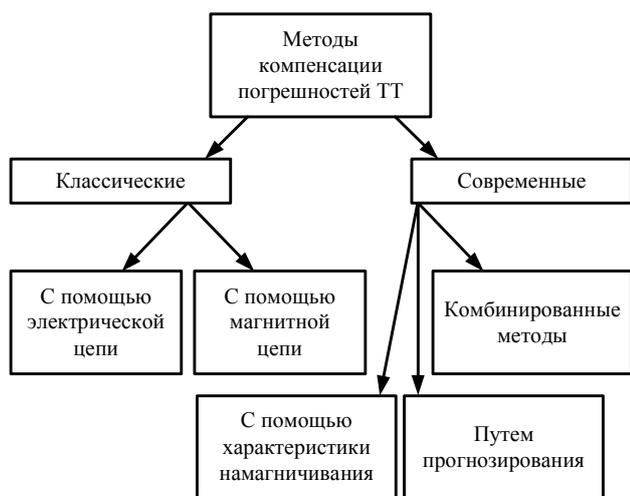


Рис. 1. Систематизация методов компенсации погрешностей ТТ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ

Рассматриваемые в данном разделе способы восстановления тока включают в себя методы прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) и комбинированные методы, использующие характеристики намагничивания и алгоритмы прогнозирования.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В работах [3–9] предложены методы восстановления вторичного тока с помощью обучения ИНС. В основу ИНС положена сигмоидальная функция [18], расположенная на скрытом уровне сети (рис. 2, закрашенные нейроны). Входными отсчетами для ИНС являются выборки искаженного тока, выходными – ожидаемый ток в режиме КЗ. Как правило, топология сети выполняется в виде «feed-forward» (прямая связь) или «feedback» (обратная связь).

В выражении (1) приведена зависимость восстановленного тока ТТ  $i_b$  от вектора входного искаженного тока  $i_2$ , весовых коэффициентов  $w_{ij}$ , функции активации  $F_k$ , а также от сумматора  $S$ , находящегося на выходном уровне сети.

$$i_b = f(i_2, w_{ij}, F_k, S) \dots \tag{1}$$

Достоинством методов является отсутствие необходимости использования параметров ТТ и их независимость от отсчетов на интервале правильной трансформации (ИПТ). При различных режимах сети и степени искаженности вторичного тока они способны восстанавливать ток с высокой точностью. Однако из-за динамичности режимов ЭС основной недостаток ИНС заключается в необходимости их обучения и адаптации ко всем режимам, что приводит к существенному увеличению требований к вычислительным ресурсам МПУ. В рамках настоящей статьи произведена апробация ИНС. При восстановлении тока с помощью ИНС были использованы вычислительные средства, встроенные в Matlab. Для восстановления вторичного тока была выбрана топология «feedback» с 10 нейронами на скрытом уровне. Обучение сети выполнялось на основе алгоритма Левенберга-Марквардта [19]. В последнем разделе настоящей статьи представлено сопоставление методов ИНС с комбинированными методами.

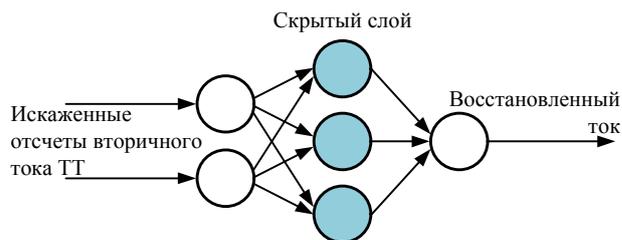


Рис. 2. Топология нейронной сети

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ

В исследованиях [10,11] предложен метод восстановления вторичного тока при наличии насыщения. Далее для удобства этот метод обозначим КМ1. Метод основывается на двух подходах: прогнозирование с помощью аппроксимации вторичного тока в виде синусоиды с наличием аperiodической составляющей и восстановление вторичного тока с использованием кривой намагничивания. В первом подходе для моделирования тока КЗ используется формула

$$i_1(t_i) = A \cdot \sin(\omega t_i + \varphi) + B \cdot e^{-\frac{t_i}{T_1}}. \quad (2)$$

С помощью метода преобразования сумм и разностей углов тригонометрических функций, а также разложения в ряд Тейлора для первого порядка выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$i_1(t_i) = A \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\omega t_i) + A \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\omega t_i) - \frac{t_i}{T_1} B + B; \quad (3)$$

$$i_1(t_i) = C_1 \cdot \sin(\omega t_i) + C_2 \cdot \cos(\omega t_i) - C_3 \cdot t_i + C_4, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – амплитуда синусоидальной и экспоненциальной составляющих;  $T_1$  – постоянная времени;  $\varphi$  – начальный угол;  $\omega$  – циклическая частота;  $C_1=A \cdot \cos(\varphi)$ ;  $C_2=A \cdot \sin(\varphi)$ ;  $C_3=B/T_1$  и  $C_4=B$ .

Для второго подхода намагничивающий ток описывается выражением:

$$i_\mu(t_i) = f(i_2(t_i), C_5) \quad (5)$$

в котором  $C_5$  – неизвестный коэффициент, заменяющий начальный магнитный поток  $\Phi_0$  в сердечнике ТТ,  $i_2$  – измеренные значения вторичного тока.

В соответствии с (4) и (5), для восстановления тока, согласно [10,11], составляется векторная функция (6):

$$f(C) = i_2 + f(i_2, C_5) - LC_{1-4}, \quad (6)$$

которая содержит  $i_2$  – вектор измеренных значений вторичного тока,  $C$  – вектор неизвестных, включающий коэффициенты  $C_{1-5}$ , и  $L$  – матрицу, составленную на основе известных слагаемых правой части (4):

$$L = \begin{pmatrix} \sin(\omega t_0) & \cos(\omega t_0) & 1 & t_0 \\ \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) & 1 & t_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\omega t_{n-1}) & \cos(\omega t_{n-1}) & 1 & t_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для поиска экстремума функции (6) ее разделяют на две части согласно [10,11]:

$$C_{1-4} = L^+ (i_2 + f[i_2, C_5]) \quad (8)$$

и

$$f(C_5) = (E - LL^+) \cdot (i_2 + f[i_2, C_5]), \quad (9)$$

где  $E$  – единичная матрица,  $L^+$  – псевдообратная матрица матрицы  $L$ . При нахождении экстремума (9) можно определить  $C_5$  и, используя (8), найти  $C_{1-4}$ .

Преимуществом настоящего метода является высокая устойчивость к зашумленности искаженного тока. Главным недостатком является необходимость затрат времени на получение некоторого дополнительного количества отсчетов на интервале насыщения в зависимости от фазы КЗ, а также степени зашумленности и величины аperiodической составляющей исходного сигнала.

В работе [12] предложен еще один метод восстановления искаженного вторичного тока. Далее для удобства метод обозначен КМ2. Восстановление по данному методу выполняется с использованием параметров как магнитной, так и электрической цепи ТТ. В отличие от КМ1 процедура вычисления магнитного потока  $\Phi_0$ , соответствующего началу насыщения, выполняется в обратную сторону, то есть искусственно расширяя ИПТ по выражению (10) рассчитывается намагничивающий ток.

$$i_\mu(t_0) = i_{2e}(t_0) - i_2(t_0), \quad (10)$$

где  $i_{2e}(t_0)$  – прогнозируемое значение первого искаженного тока.

После этого по характеристике намагничивания  $i_\mu = f(\Phi)$  определяется магнитный поток, соответствующий началу насыщения.

Таким образом, зная намагничивающий ток в искусственно расширенной части ИПТ, магнитный поток  $\Phi_0$ , активные и реактивные сопротивления на вторичной стороне ТТ, по выражению (11), предложенному в [20], можно определить ток насыщенной части:

$$w_2 \cdot [\Phi(t) - \Phi(t_0)] = R_2 \int_{t_0}^t i_2(\lambda) \cdot d\lambda + L_2 \cdot [i_2(t) - i_2(t_0)]. \quad (11)$$

Преимущество алгоритма заключается в его устойчивости к остаточной намагниченности в сердечнике ТТ. Однако при наличии во входном сигнале аperiodической составляющей со значительным временем затухания и зашумленности сигнала на ИПТ прогнозируемое значение получается с высокой погрешностью, и алгоритм восстановления тока с использованием характеристики намагничивания будет приводить также к большим погрешностям.

АПРОБАЦИЯ

Была проведена апробация методик, предложенных в [3–12]. Для выполнения апробации была выбрана математическая модель ТТ, предложенная в [21]. Моделирование выполнялось аналогично [17] в среде Matlab с частотой дискретизации, равной 2 кГц, которая используется в настоящее время в коммуникационных сетях систем релейной защиты. В модель закладывались параметры ТТ типа ТФНД-

110М [22] с формой кривой намагничивания, близкой к спрямленной характеристике, и параметрами, равными: сопротивление вторичной обмотки  $R_2=1,52$  Ом, индуктивность вторичной обмотки  $L_2=1,2$  мГн, коэффициент трансформации  $k_1=800/5$ , поперечное сечение магнитопровода  $S=17,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> и длина средней линии  $l=0,935$  м. В качестве первичного тока был использован сигнал, форма которого описывается выражением.

$$i_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ A \cdot \sin(\omega t + \varphi) + B \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (12)$$

Известно, что на момент возникновения насыщения сердечника ТТ влияют различные факторы, а именно: начальный угол, амплитуда периодической составляющей, постоянная времени затухания, кратность тока КЗ и остаточная магнитная индукция в момент возникновения КЗ.

В соответствии с влияющими факторами апробация производилась для следующих моделируемых режимов:

1) КЗ с начальным углом  $\varphi = -90^\circ$ , с остаточной магнитной индукцией  $B_0 = 0,5$  Тл и постоянной времени  $T_1 = 0,1$  с;

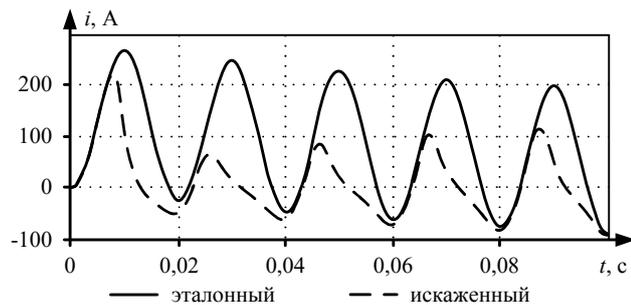
2) КЗ с начальным углом  $\varphi = 0^\circ$ , с остаточной магнитной индукцией  $B_0 = 1$  Тл и постоянной времени  $T_1 = 0,05$  с.

3) КЗ с начальным углом  $\varphi = -90^\circ$ , с остаточной магнитной индукцией  $B_0 = 1$  Тл и постоянной времени  $T_1 = 0,05$  с.

4) При наличии зашумленности исходного сигнала с начальным углом  $\varphi = -170^\circ$ , с остаточной магнитной индукцией  $B_0 = 0$  Тл и постоянной времени  $T_1 = 0,025$  с.

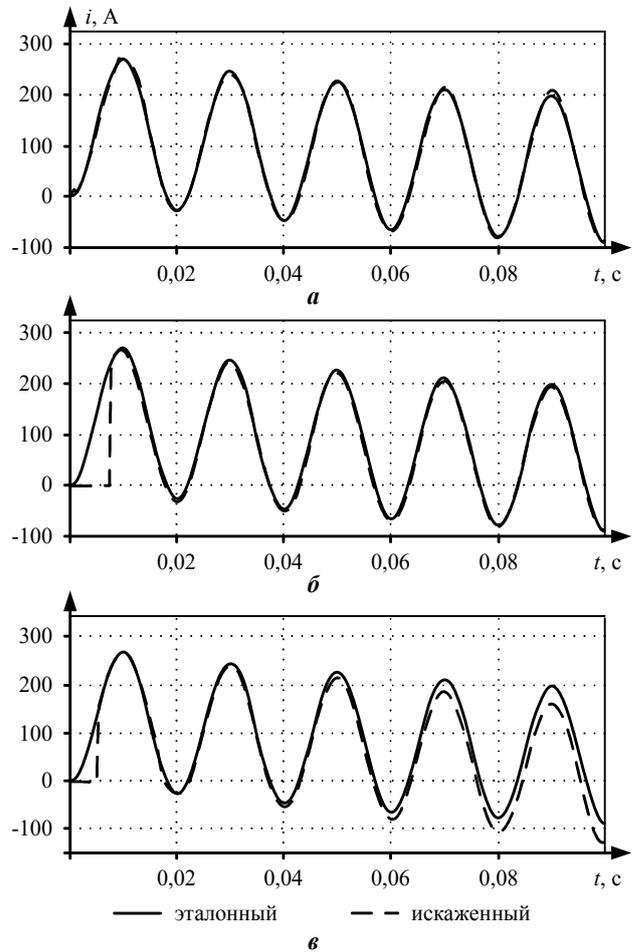
**Режим 1.** На **рис. 3** искаженный вторичный ток ТТ при насыщении представлен пунктирной линией, а исходный первичный ток, приведенный ко вторичной цепи (эталонный), сплошной линией. Результаты восстановления тока для этого режима представлены на **рис. 4**.

На **рис. 4, а** показан результат работы методов прогнозирования с помощью ИНС [3–9], а на **рис 4, б** – результат работы метода КМ1. Восстановление тока методом КМ2 представлено на **рис. 4, с**. Метод КМ2 состоит из алгоритмов прогнозирования и использования характеристики намагничивания ТТ. На этом рисунке сплошные линии соответствуют эталонному току, пунктирные – восстановленному.

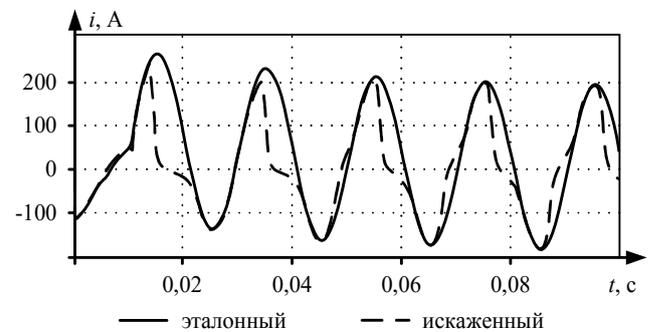


**Рис. 3. Эталонный ток (сплошная) и искаженный ток (пунктирная)**

В качестве исходного сигнала с содержанием шума (**режим 4**) взяты данные переходного процесса КЗ, представленные на **рис. 5**. На этом рисунке ток КЗ (эталонный) представлен сплошной линией, а искаженный вторичный ток – пунктирной линией. Результаты восстановленного тока для этого режима приведены в **табл. 1**.



**Рис.4. Эталонный и восстановленный ток: а – с помощью ИНС; б – методом КМ1; с – с помощью КМ2**



**Рис. 5. Эталонный ток (сплошная) и искаженный ток (пунктирная)**

**Таблица 1**  
**Погрешности методов восстановления вторичного тока ТТ при различных параметрах насыщения**

Источник	Метод	Режимы							
		1		2		3		4	
		$f_i^{cp}, \%$	$\varepsilon^{cp}, \%$						
[3–9]	ИНС	-0,12	1,85	1,7	7,3	0	3,3	7,5	-0,03
[10,11]	КМ1	4,6	11	0,66	10	1,9	9,44	--	--
[12]	КМ2	2,4	2,7	9,3	12,8	12,7	16,6	-4,32	33

Далее в табличном виде для всех четырех режимов приведен сравнительный анализ рассмотренных методов с различными подходами к восстановлению вторичного тока. Для каждого из них определены усредненные токовая  $f_i^{cp}$  и полная  $\varepsilon^{cp}$  погрешности [1] восстановленного тока на интервале моделирования. Необходимо отметить, что токовая погрешность  $f_i^{cp}$  без использования методов компенсации при насыщении сердечника ТТ для модельного сигнала составляет порядка 75–85%, а для реального – 62%.

По выражению (13) определяется выраженная в процентах относительная усредненная погрешность восстановленного тока:

$$f_i = \frac{I_2 - I_1 / k_T}{I_1 / k_T} \cdot 100, \tag{13}$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – действующее значение соответственно эталонного и восстановленного токов на периоде.

Вычисление полной погрешности  $\varepsilon$  было произведено с помощью нижеприведенного выражения и также выражается в процентах.

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{i_{1n}}{k_T} - i_{2n} \right)^2}, \tag{14}$$

где  $N$  – количество отсчетов за период.

Следует отметить, что для восстановления реального сигнала с помощью КМ2 [12] при прогнозировании на основе ИПТ без учета апериодической составляющей результат получается более точным относительно результата восстановления тока этим же методом с учетом апериодической составляющей. Также следует отметить, что метод КМ1, предложенный в [10,11], оказался не способным восстановить реальный ток КЗ, форма которого представлена на рис. 5. Это объясняется тем, что в ИПТ этого тока присутствует излом формы сигнала,

связанный с переходом от нормального режима к режиму КЗ. Для устранения этой проблемы предлагается добавить в алгоритм механизм селекции, который позволит ограничить ИПТ участком кривой, относящемуся только к переходному режиму КЗ.

В табл. 2 приведены свойства рассмотренных в данной работе методов. Описаны их достоинства и недостатки, а также используемый подход к восстановлению искаженного вторичного тока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе выполнен обзор существующих методов восстановления формы искаженного вторичного тока при КЗ с апериодической составляющей. В ходе анализа определены достоинства и недостатки рассмотренных методов. Выявлена точность восстановления тока с помощью комбинированных методов и методов на основе ИНС.

2. Погрешность ТТ в режимах КЗ при насыщении сердечника ТТ выходит за пределы допустимой (5-10%), которая влияет на корректное функционирование устройств РЗА. В связи с этим при разработке алгоритмов для микропроцессорных устройств должна быть предусмотрена коррекция формы искаженного тока. Требование к скорости работы алгоритма компенсации погрешности ТТ является определяющим фактором для релейной защиты.

3. Восстановление искаженного вторичного тока с помощью комбинированных методов оказывается более эффективным относительно применения методов, использующих искусственные нейронные сети, вследствие того, что комбинированные методы обладают более высокой точностью и надежностью. Однако для достижения высокой точности этими методами необходима точная детекция момента насыщения и правильный выбор интервала правильной трансформации ТТ.

Таблица 2

Достоинства и недостатки методов восстановления вторичного тока ТТ

Источник	Подход	Достоинства и недостатки
[3–9]	На основе ИНС	(+) Высокая точность и устойчивость при различной степени зашумленности сигнала, (-) Учет режимов сети и факторов насыщения требует высоких вычислительных ресурсов и большого объема памяти
[10,11]	На основе кривой намагничивания и вторичного тока	(+) Высокая точность, устойчивость в отношении зашумленности сигнала, (-) необходимость наличия искаженных отсчетов, задержка по времени восстановления
[12]		(+) Устойчивость к остаточной магнитной индукции, (-) результат сильно зависит от точности значения прогнозирования, высокая чувствительность к зашумленности сигнала

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. РД 153-34.0-35.301.2002. М.: ОРГРЭС, 2003. 152 с.
- Трансформаторы тока : учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота, Б.С. Стогний.

- СПб.: Энергоатомиздат, 1989. 416 с.
3. Saha M.M., Izykowski J., Lukowicz M., Rosolowski E. Application of ANN methods for instrument transformer correction in transmission line protection // *Developments in Power System Protection, Conference Publication. IEE*, 2001, no. 479, pp. 303–306. DOI: 10.1049/cp:20010160.
  4. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A., David S. Neural network for current transformer saturation correction // *In Proc. IEEE Transmis. Distrib. Conf. New Orleans, LA, 1999*. P. 441–446. DOI: 10.1109/TDC.1999.755390.
  5. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2001. Vol. 16, no. 2, pp. 189–194. DOI: 10.1109/61.915481
  6. Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006. Vol. 21, no. 1, pp. 73–79. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858799
  7. Baoming G., de Almeida A.T., Ferreira Fernando J. T.E. Estimation of primary current in saturated current transformer using flexible neural network // *Trans. Inst. Meas. Control.* 2006. Vol. 28, no. 1, pp. 81–91. DOI: 10.1191/0142331206tm164oa.
  8. Cummins J.C., Yu D.C., Kojovic L.A. Simplified artificial neural network structure with the current transformer saturation detector provides a good estimate of primary currents // *the Power Eng. Soc. Sum. Meeting, Seattle, WA, USA, 2000*, pp. 1373–1378. DOI: 10.1109/PESS.2000.868725.
  9. Erenturk K. ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24, no. 1, pp. 195–201. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005882.
  10. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Jiang L. Fast compensation of current transformer saturation // *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur. 2010*, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638931.
  11. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Guo C. X. Current transformer saturation compensation based on a partial nonlinear model // *Electr. Power Syst. Res.* 2013. Vol. 97, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.11.019.
  12. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2015. Vol. 30, no. 5, pp. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
  13. Ziegler G. *Digital Differential Protection*. Belo Horizonte, 2005.
  14. Протокол совместного заседания <...> по теме «Вопросы координации работы релейной защиты и измерительных ТТ» 2015. Режим доступа: [http://www.cigre.ru/research\\_commitets/ik\\_rus/b5\\_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90\\_11.09.2015.pdf](http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b5_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90_11.09.2015.pdf).
  15. Корчанова А.С., Федосов Д.С. Об изменениях в нормативной документации по трансформаторам тока для релейной защиты // *IV Международный молодёжный форум «Интеллектуальные энергосистемы»*. 2016. С. 51–55.
  16. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони, А.А. Шурупов, А.А. Петров, И.А. Кошельников // *Релейная защита. Научно-практическое издание*. 2019. С. 28–36.
  17. Паздерин А.В. Мурзин П.В., Одинаев И.Н., Бобокалонов Ф.З. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. Вып. 45. №4. С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11.
  18. Bekir K., Vehbi Olgac A. Performance Analysis of Various Activation Functions in Generalized MLP Architectures of Neural Networks // *Int. J. Artif. Intell. Expert Syst.* 2011. Vol. 1, no. 4, pp. 111–122.
  19. Пархоменко С.С., Леденёва Т.М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга-Марквардта в условиях большого количества данных // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии*. 2014. Vol. 2, pp. 98–106.
  20. Kang Y.C., Lim U.J., Kang S.H., Crossley P.A. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004. Vol. 19, no. 4, pp. 1642–1649. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835266.
  21. Петелин С. Модель однофазного трансформатора тока с насыщением. Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/>.
  22. Королев Е.П., Либерзон Э.М. *Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты*. М: Энергия, 1980. 208 с.

Поступила в редакцию 03 апреля 2020 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### ANALYSIS OF MATHEMATICAL METHODS FOR DECREASING THE SATURATED CURRENT TRANSFORMER ERROR

Ismoil N. Odinaev

Research engineer, Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: [ismoil.odinaev@urfu.ru](mailto:ismoil.odinaev@urfu.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2434-1929>.

Pavel V. Murzin

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: [p.v.murzin@urfu.ru](mailto:p.v.murzin@urfu.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1593-9833>.

Andrey V. Pazderin

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

Valeriy A. Tashchilin

Ph.D. (Engineering), Leading Engineer, Associate Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.tashchilin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8763-3705>

Aleksandar Sukalo

Ph.D. (Engineering), Elektroperenos - Elektroprijenos BiH, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. E-mail: a.sukalo@elprenos.com

At different times, different devices were used as current sensors at electric power systems. However, the instrumental electromagnetic current transformers (CTs) proved more suitable and have been the most commonly adopted. The wide application of the CTs can also be justified by their reliability, subject to the operation rules. Accuracy and reliability of measured information sent from instrumental CTs are one of the important components for the correct operation of power system protection, data acquisition and telemetry systems, process control systems at electrical power facilities. There have been developed a lot of numerical methods for compensation of current transformer (CT) saturation. The article provides the comparison of several mathematical methods for secondary current restoration. The accuracy of different methods was analyzed under various conditions, namely, remaining flux, initial phase of short circuit current and noise presence. Linear combination of sine wave and aperiodic function was used as a test primary signal along with real short circuit current scope. Based on the performed analysis some recommendations and further development directions are stressed.

**Keywords:** current transformers (CTs), distorted secondary current, magnetizing curve, compensated current, magnetizing current, unsaturated section.

#### REFERENCES

1. *Instruksiya po proverke transformatorov toka, ispolzuemyh v shemah relejnoj zashhity i izmerenija* [Instruction for checking CT]. RD 153-34.0-35.301.2002. Moscow: ORGRJeS, 2003. 152 p. (In Russian)
2. Afanasyev V.V., Adonyev N.M., Kibel, V.M., Sirota I.M., Stognij B.S. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad, Energy, 1989, 416 p. (In Russian)
3. Saha M.M., Izykowski J., Lukowicz M., Rosolowski E. Application of ANN methods for instrument transformer correction in transmission line protection // *Developments in Power System Protection*, Conference Publication. IEE, 2001, no. 479, p. 303–306. DOI: 10.1049/cp:20010160.
4. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A., David S. Neural network for current transformer saturation correction // In Proc. IEEE Transmis. Distrib. Conf. New Orleans, LA, 1999. P. 441–446. DOI: 10.1109/TDC.1999.755390.
5. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2001. Vol. 16, no. 2, p. 189–194. DOI: 10.1109/61.915481.
6. Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006. Vol. 21, no. 1, p. 73–79. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858799.
7. Baoming G., de Almeida A.T., Ferreira Fernando J. T.E. Estimation of primary current in saturated current transformer using flexible neural network // *Trans. Inst. Meas. Control.* 2006. Vol. 28, no. 1, p. 81–91. DOI: 10.1191/0142331206tml164oa.
8. Cummins J.C., Yu D.C., Kojovic L.A. Simplified artificial neural network structure with the current transformer saturation detector provides a good estimate of primary currents // *the Power Eng. Soc. Sum. Meeting*, Seattle, WA, USA, 2000. P. 1373–1378. DOI: 10.1109/PESS.2000.868725.
9. Erenturk K. ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24, no. 1, p. 195–201. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005882.
10. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Jiang L. Fast compensation of current transformer saturation // *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.* 2010. P. 1–7. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638931.
11. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Guo C. X. Current transformer saturation compensation based on a partial nonlinear model // *Electr. Power Syst. Res.* 2013. Vol. 97. P. 34–40. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.11.019.
12. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2015. Vol. 30, no. 5, p. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
13. Ziegler G. *Digital Differential Protection*. Belo Horizonte, 2005.
14. *Protokol sovmestnogo zasedaniya <...> po teme "Voprosy koordinacii raboty relejnoj zashhity i izmeritel'nyh TT"* [Protocol of the joint meeting <...> on the theme of «The issues of coordination for relay system operation and instrumental CTs»] 2015, Available at: [http://www.cigre.ru/research\\_committees/ik\\_rus/b5\\_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90\\_11.09.2015.pdf](http://www.cigre.ru/research_committees/ik_rus/b5_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90_11.09.2015.pdf). (In Russian)
15. Korchanova A.S., Fedosov D.S. About changes in the CTs standards documentation for relay protection. *IV Mezhdunarodnyj molodjozhnyj forum «Intellektualnye Energosistemy»* [IV International Youth Forum "Intelligent Energy Systems"], 2016. Pp. 51–55. (In Russian)
16. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A., Petrov A.A., Koshelnikov I.A. Analysis Of Non-Selective Actions Of Busbar Differential Protection At External Single-Phase Short Circuits With Saturation Of Current Transformer In A Healthy Phase. *Releynaya zashhita. Nauchno-prakticheskoe izdanie* [Relay protection. Scientific and practical publication], 2019. P. 28–36. (In Russian)
17. Pazderin A.V., Murzin P.V., Odinaev I.N., Bobokalonov F.Z. Survey of data reliability in digital substations. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019. Vol. 45, no. 4, p. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11. (In Russian)
18. Bekir K., Vehbi Olgac A. Performance Analysis of Various Activation Functions in Generalized MLP Architectures of Neural Networks // *Int. J. Artif. Intell. Expert Syst.* 2011. Vol. 1, no. 4, p. 111–122.
19. Parhomenko S. S., Ledenjova T. M. Neural networks training by Levenberg-Marquardt during data bulk condition. *Vestnik VGU, Seriya: Sistemnyj analiz i informatsionnye tehnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: System analyses and Information Technology], 2014, vol. 2, pp. 98–106. (in Russian)
20. Kang Y.C. et al. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004. Vol. 19, no. 4, pp. 1642–1649. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835266.
21. Petelin S. Single phase CT model with saturation. *Tsifrovaya podstantsiya* [Digital substation], Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/> (ac-

- cessed 5 November 2019). (In Russian)
22. Korolev E.P., Liberzon Je.M. *Raschet dopustimyh nagruzok v tokovyh tsepyah relenoy zashhity* [Calculation load ability in the current circuits for protection] Moscow: Energy, 1980. 208 p. (In Russian)
- 
- Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения / И.Н. Одинаев, П.В. Мурзин, А.В. Паздерин, В.А. Ташчилин, А. Шукало // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 11-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
- Oдинаев I.N., Murzin P.V., Pazderin A.V., Tashchilin V.A., Sukalo A. Analysis of Mathematical Methods for Decreasing the Saturated Current Transformer Error. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 11-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
-