

Расчетная модель для оценки характеристик электромагнитных трансформаторов тока

МИРОНЮК Н.Е., СОБОЛЕВ А.С., ПУДОВ В.И.

Разработана и апробирована нелинейная расчетная модель для оценки точностных характеристик (основных и дополнительных погрешностей), электромагнитных трансформаторов тока с учетом условий их эксплуатации, характеризующихся несинусоидальностью измеряемого тока и остаточной намагниченностью нелинейного элемента – ферромагнитного магнитопровода. Эффективное функционирование расчетной модели основано на использовании экспериментальных динамических петель гистерезиса материала магнитопровода трансформаторов тока, к которым приближают расчетные аналоги петель путем вариации основных параметров, влияющих на точностные характеристики трансформаторов тока. Применение расчетной модели позволяет учитывать условия эксплуатации трансформаторов тока при оценке их фактических точностных характеристик, которые могут отличаться от нормированных характеристик для данного класса точности трансформаторов тока. На основе предлагаемой нелинейной расчетной модели могут быть разработаны общий метод и методика для оценки точностных характеристик конструируемых трансформаторов тока с учётом их параметров и условий эксплуатации, что позволит оптимизировать параметры и существенно повысить эффективность применения трансформаторов тока.

Ключевые слова: трансформаторы тока, расчетная модель, точностные характеристики, класс точности, несинусоидальность измеряемого тока

Электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) нашли широкое применение в энергетике (учет расхода электроэнергии), измерительной технике, релейной защите и других областях [1]. Качество ТТ применительно к выполнению ими измерительной функции определяется уровнем их точностных характеристик, т.е. основных и дополнительных погрешностей [2–4]. Комплекс нормированных метрологических характеристик (НМХ) ТТ формируется согласно [3] по второй группе метрологических характеристик (МХ), соответствующей модели 2, для которой случайная составляющая основной погрешности ТТ пренебрежимо мала. В этом случае комплекс НМХ ТТ может быть выражен формулой (без учета динамической и случайной составляющих погрешностей от гистерезиса):

$$D_{M2} = D_{0s} \mathop{\text{a}}^1 D_{ci}, \quad (1)$$

где D_{0s} – систематическая составляющая основной погрешности; $\mathop{\text{a}}^1 D_{ci}$ – объединение дополнительных погрешностей, обусловленных действием влияющих величин.

Формула (1) представляет символическую запись объединения двух составляющих погрешностей ТТ в реальных условиях их применения. По документам [5–7] нормируются только пределы токовой и угловой допускаемых погрешностей ТТ

для синусоидального тока в условиях размагниченого состояния магнитопровода, т.е. не учитываются дополнительные погрешности от влияющих факторов.

Однако ТТ часто функционируют в более сложных реальных условиях эксплуатации, отличающихся от нормальных условий рядом факторов, которые могут значительно повлиять на фактические точностные характеристики ТТ [4]. Такими факторами являются, например, несинусоидальность измеряемого первичного тока, имеющая место, например, при перегрузках и искажении сети потребителем, а также наличие остаточной намагниченности магнитопровода ТТ, возникающей, например, при грозовых разрядах или коротких замыканиях в сети. Влияние выше указанных факторов не учтено в оценке точностных характеристик ТТ действующими нормативными документами [5, 6], что может привести к недостоверности измерительной информации, получаемой от ТТ в реальных условиях эксплуатации.

Одной из актуальных задач является оценка точностных характеристик ТТ при несинусоидальном измеряемом первичном токе. В [8] предпринята попытка учета несинусоидальности измеряемого тока посредством механического добавления к основной гармонике первичного тока высших гармоник вплоть до сороковой. Однако, как справедливо указано в [9], посвященной анализу влияния несинусоидальности измеряемого тока на погрешности

ТТ, предложенный в [8] способ неприемлем. Причина заключается в том, что процесс преобразования первичного тока авторы [8], по сути дела, рассматривают как осуществляющийся по линейному закону, хотя это не так из-за наличия нелинейного элемента — магнитопровода. Как отмечено в [9], для получения выражений для определения погрешностей ТТ при несинусоидальном входном сигнале требуется создание математической модели ферромагнитного материала магнитопровода.

Дальнейшее развитие работ по оценке погрешностей измерения несинусоидального тока представлено в нормативном документе [10] (введен в действие в Российской Федерации с 1.01 2014), который является модифицированным изложением европейского стандарта [11]. В этих нормативных документах предлагается оценивать влияние несинусоидальности первичного тока путем мониторинга по частоте вторичного тока, например, построением амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Однако в [12] установлена ограниченность европейского стандарта [11], основанного на методе АЧХ для эффективного оценивания влияния несинусоидальности первичного тока на погрешности ТТ. В [12] проведением детальных экспериментальных исследований показано, что метод АЧХ, основанный на принципе суперпозиции, не учитывает его нарушение, обусловленное нелинейностью характеристики магнитопровода. В [12] предлагается в отличие от АЧХ другой способ оценки влияния несинусоидальности первичного тока на погрешности ТТ. Этот способ заключается в анализе и оценке влияния на погрешности ТТ комбинаций из двух гармоник в первичном токе: основной гармоники и последовательно высших гармоник (2, 3, 5, 7-й) при разных углах их фазового сдвига относительно основной гармоники. Результаты сравнительных экспериментов, приведенные в [12], свидетельствуют о неадекватности оценок погрешностей, получаемых по стандарту [11], в котором игнорируется такой фактор, как влияние на погрешности ТТ фазовых углов высших гармоник. В [12] экспериментально подтверждено, что фазовые углы высших гармоник (правильнее — углы фазового сдвига высших гармоник по отношению к 1-й гармонике) являются одним из основных факторов, влияющих на оценку погрешностей. Предложенный в [12] способ позволяет более эффективно по сравнению с методом АЧХ оценивать влияние несинусоидальности измеряемого тока на погрешности ТТ. Приведенные в [12] нетривиальные результаты по оценке влияния несинусоидальности первичного тока на погрешности ТТ согласуются с ранними экспериментами, изложенными в [13], где

установлено существенное влияние 3-й гармоники в составе первичного тока на погрешность ТТ.

Оценка влияния реальных условий эксплуатации на точностные характеристики ТТ представляет собой сложную метрологическую задачу, для решения которой эффективным инструментом может быть, по нашему мнению, специально разработанная расчетная нелинейная модель функционирования ТТ. Применение расчетной модели позволит на основе использования физических закономерностей и результатов экспериментальных исследований оценить фактические пределы точностных характеристик ТТ, которые могут отличаться от их нормированных значений.

В статье рассмотрен комплекс вопросов по разработке и апробации нелинейной расчетной модели для оценки фактических пределов точностных характеристик ТТ с учётом реальных условий эксплуатации.

Разработка расчетной модели функционирования электромагнитных трансформаторов тока. Расчетная модель представляет собой приближенный способ, разрабатываемый для решения прикладных задач. Расчетная модель отличается как от сложной и максимально приближенной к оригиналу физической модели, так и от математической модели, базирующейся на сугубо математических уравнениях. В расчетной модели сложные зависимости аппроксимируются приближенными соотношениями с исключением несущественных факторов. Такое упрощение при сохранении существенных особенностей решаемой задачи позволяет применять вычислительную технику для численных расчетов.

Условия и приближения для построения расчетной модели. Известная принципиальная схема одноступенчатого ТТ и его эквивалентная схема приведены на рис. 1.

Принцип действия ТТ в линейном приближении детально изложен в [1], где показано, что результирующий магнитный поток Φ_0 , практически синфазный с первичным магнитным потоком Φ_1 , относительно Φ_1 мал. Это обеспечивает функционирование трансформатора в обратимой области перемagnичивания магнитопровода — области Релея [14, 15]. Например, для электротехнических сталей, применяемых в ТТ, область Релея достигает по индукции значений 0,3–0,4 Тл [15], тогда как рабочая область для ТТ составляет не более 0,15 Тл [1].

Именно переменный магнитный поток Φ_0 и является тем передаточным звеном, посредством которого осуществляется передача энергии от первичной обмотки к вторичной в процессе преобразования тока. В стационарном режиме часть приве-

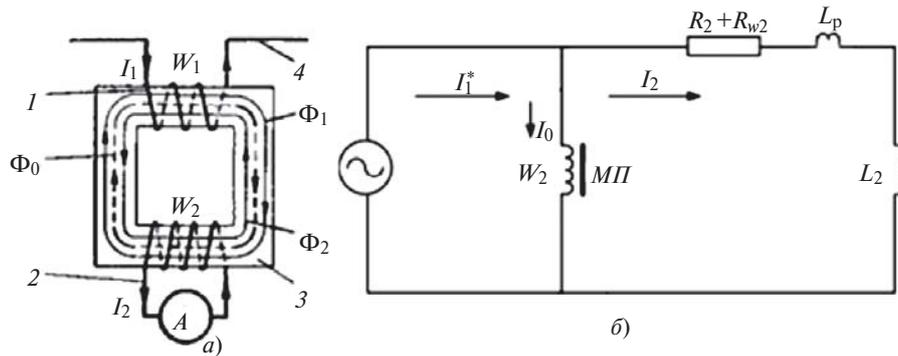


Рис. 1. Общая схема формирования в магнитопроводе результирующего магнитного потока (а): 1 – первичная обмотка W_1 ; 2 – вторичная обмотка W_2 ; 3 – магнитопровод (МП); 4 – линия силового тока; Φ_1 – первичный магнитный поток; Φ_2 – вторичный магнитный поток; Φ_0 – результирующий магнитный поток; I_1 – первичный силовой ток; I_2 – вторичный ток; A – нагрузка во вторичной цепи; и эквивалентная схема электромагнитного трансформатора тока (б): I_1^* – первичный ток, приведенный к вторичной цепи; I_2 – ток вторичной цепи; I_0 – ток намагничивания магнитопровода; R_2 – активное сопротивление вторичной нагрузки; R_{w2} – сопротивление вторичной обмотки; L_2 – индуктивность вторичной нагрузки; L_p – индуктивность рассеяния, обусловленная магнитными потоками рассеяния

денного к вторичной обмотке первичного тока I_1^* идет на намагничивание магнитопровода, а оставшая часть трансформируется во вторичную цепь, т.е. первичный ток как бы разветвляется по двум параллельным цепям: по цепи нагрузки – ток I_2 и цепи намагничивания – ток I_0 . Этому соответствует эквивалентная схема рис. 1, б. Однако линейное приближение при рассмотрении работы ТТ не отражает в полной мере реальный процесс преобразования токов из-за наличия нелинейного элемента – ферромагнитного магнитопровода. Процесс преобразования первичного тока во вторичный ток в реальном ТТ происходит приблизительно следующим образом. Первичный в общем случае несинусоидальный ток I_1 создает в первичной обмотке переменное магнитное поле. При намагничивании магнитопровода в нем из-за нелинейности его магнитных свойств, магнитной вязкости и поверхностного эффекта (скин-эффекта) [14, 16–18] формируется несинусоидальный магнитный поток Φ_1 , но уже с измененным гармоническим составом по сравнению с первичным током. Этот сформированный магнитный поток Φ_1 , пересекая витки вторичной обмотки W_2 , создает в ней также несинусоидальный вторичный ток I_2 . При протекании этого тока во вторичной цепи в магнитопроводе создается несинусоидальный вторичный магнитный поток Φ_2 , направленный приблизительно противофазно первичному магнитному потоку Φ_1 . В результате взаимодействия этих потоков формируется результирующий несинусоидальный магнитный поток Φ_0 . Этот результирующий магнитный поток, сцепляясь с витками первичной и вторичной обмоток, создает процесс трансформации токов. В результате нелинейных потерь (энергия нелинейных процессов перемагничивания магнитопровода, рассеивание магнитных потоков и др.) не

удаётся связать посредством номинального коэффициента трансформации значение вторичного контролируемого несинусоидального тока со значением измеряемого первичного синусоидального тока. Действительный коэффициент трансформации является комплексной величиной, характеризующей активные и реактивные потери процесса преобразования токов, что выражается в формировании токовой и угловой погрешности реального ТТ.

Приведенная упрощенная схема функционирования ТТ может быть положена в основу построения нелинейной расчетной модели для оценки его точностных характеристик.

Для реализации расчетной модели необходимо сформулировать условия и приближения, исходя из физических закономерностей преобразования первичного тока во вторичный в условиях наличия в трансформаторе нелинейного элемента – ферромагнитного магнитопровода. При разработке нелинейной расчетной модели приняты следующие основные приближения и условия:

- 1) преобразование переменного магнитного поля в магнитную индукцию в магнитопроводе происходит по частным динамическим петлям гистерезиса с учётом нелинейности по Релею [14, 15];
- 2) магнитопровод полностью промагничен переменным магнитным полем в условиях слабого поверхностного эффекта [17];
- 3) динамика нелинейного процесса перемагничивания магнитопровода переменным магнитным полем в основном определяется совместным действием магнитной вязкости и поверхностного эффекта [14, 18];
- 4) в качестве основной гармоники первичного измеряемого тока принимаем электромагнитные

колебания промышленной частотой 50, 60 Гц (в России 50 Гц).

Основные параметры модели и расчетные формулы. При построении нелинейной расчетной модели используем следующие основные параметры, которые можно разбить на три группы.

1. **Конструктивные параметры [1,16]:** W_1, W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток¹ соответственно; W_n – номинальное число витков вторичной обмотки; $K_n = (W_n / W_1)$ – номинальный коэффициент трансформации; $2d$ – толщина ленты магнитопровода, м; S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²; l – средняя длина магнитной силовой линии магнитопровода, м.

2. **Электромагнитные параметры магнитопровода [16,17]:** μ_a – начальная магнитная проницаемость ферромагнитного материала магнитопровода; g – удельная проводимость магнитного материала, 1/(Ом·м); b – константа Релея для магнитного материала магнитопровода, (м/А); r – коэффициент магнитной вязкости, Ом/м.

3. **Параметры первичной и вторичной электрических цепей [1]:** значения первичного измеряемого тока (амплитуды и фазы гармонических составляющих); значения активной и индуктивной нагрузки, электрическое сопротивление вторичной обмотки и проводов вторичной электрической цепи.

В основу построения нелинейной расчетной модели для ТТ положены параметры магнитопровода как нелинейного элемента. Процесс преобразования токов в ТТ для разрабатываемой расчетной модели можно, как и в [16], приближенно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 & 1) \quad I_1 = \frac{I_2 W_2}{W_1}; \\
 & 2) \quad \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{W_2 S} \frac{\partial}{\partial t} \left(I_1^* (R_2 + R_{w2}) + (L_2 + L_p) \frac{\partial I_1^*}{\partial t} \right); \\
 & 3) \quad B = \int_0^t \frac{\partial B}{\partial t} dt; \\
 & 4) \quad B_m = \max(B); \\
 & 5) \quad H_m = \sqrt{\frac{\mu_a}{2b} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} + \frac{B_m}{m_b} - \frac{m_a}{2b}}; \\
 & 6) \quad H_{st}^2 \pm \frac{2(m_a + b H_m) H_{st}}{b} - \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \pm H_m \frac{\partial B}{\partial t} = 0; \\
 & 7) \quad H = H_{st} + \frac{\partial B}{\partial t} \frac{1}{r} + \frac{g d^2}{3} \frac{\partial^3 B}{\partial t^3}; \\
 & 8) \quad I_0 = \frac{H l}{W_2};
 \end{aligned} \tag{2}$$

¹ При отсутствии витковой коррекции $W_2 = W_n$.

$$9) \quad I_2 = I_1^* - I_2;$$

$$10) \quad I_{2i} = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}; \dots; I_{2i} = \arctan \frac{B_i}{A_i} \frac{\partial}{\partial t}$$

где H – переменное намагничивающее поле, А/м; B – магнитная индукция в магнитопроводе, Т; H_m – значение магнитного поля, соответствующее максимуму магнитного поля H_{st} для статической петли гистерезиса, А/м; B_m – максимальное значение индукции магнитного поля, Т; $(R_2 + R_{w2})$ – активное сопротивление вторичной цепи, Ом; $\mu_0 = 12,560 \times 10^{-7}$, Гн/м – магнитная постоянная; I_1, I_2, I_0 – первичный, вторичный и намагничивающий токи соответственно, А; A_i и B_i – коэффициенты разложения тока I_2 в ряд Фурье по гармоническим составляющим, А; в выражении для H_{st} знак «плюс» соответствует восходящей ветви петли гистерезиса, «минус» относится к нисходящей ветви.

В системе уравнений (2) одним из основных для построения расчетной модели является уравнение вида

$$H = H_{st} + \frac{\partial B}{\partial t} \frac{1}{r} + \frac{g d^2}{3} \frac{\partial^3 B}{\partial t^3} = H_{st} + K \frac{\partial B}{\partial t},$$

где K – размерный параметр, с помощью которого можно учесть отклонение от модели слабого поверхностного эффекта.

Это уравнение было получено из выражений, приведенных в [16, 19], и отражает в аддитивной форме совокупное влияние на формирование результирующего магнитного поля в магнитопроводе трех факторов:

- статического магнитного поля, H_{st} ;
- магнитной вязкости с малым временем релаксации, $1/r$;
- слабого магнитного поверхностного эффекта, $(g d^2)/3$.

Совокупность приведенных условий, приближений и системы уравнений (2) является необходимой для построения нелинейной расчетной модели при оценке точностных характеристик в реальных условиях эксплуатации ТТ.

Варьируемыми величинами при использовании представленной расчетной модели для оценивания точностных характеристик конкретного ТТ являются начальная магнитная проницаемость μ_a , константа Релея b , коэффициент магнитной вязкости r , а также параметры измеряемого тока (амплитуда и фаза).

Следует отметить, что в [1] несинусоидальные режимы и влияние фаз составляющих гармоник на погрешности измерений ТТ не рассматриваются.

Схема функционирования расчетной модели. Физической основой расчетной модели являются экспериментальные динамические петли гистерезиса

магнитопровода исследуемых ТТ. Эффективное функционирование расчетной модели основано на использовании экспериментальных динамических петель гистерезиса материала магнитопровода ТТ, к которым приближают их расчетные аналоги путем вариации основных параметров, влияющих на точностные характеристики ТТ. Эти параметры петли в последующем используются согласно эквивалентной схеме рис. 1,б для оценки точностных характеристик ТТ, которые при измерении переменного тока сложного гармонического состава посредством ТТ можно определить по известным формулам [1], но для каждой гармоники:

$$d_i = \frac{I_{2i} - I_{1i} \frac{W_1}{W_n}}{I_{1i} \frac{W_1}{W_n}} 100\%; Q_i = (Q_{2i} - Q_{1i}), \text{ мин}, (3)$$

где I_{2i} , I_{1i} , Q_{2i} , Q_{1i} – амплитуды и фазы i -й гармоники вторичного и первичного токов соответственно.

Из (3) следует, что точностные характеристики ТТ зависят от конкретного гармонического состава как измеряемого первичного тока, так и фиксируемого вторичного тока.

Реализация функционирования расчётной модели осуществляется по блок-схеме (рис. 2), номера цифр на элементах которой соответствуют порядковым номерам уравнений в системе уравнений (2). На вход блока 1 подается измеряемый ток либо синусоидальный, либо сформированный путём аддитивного суммирования мгновенных значений основной и высших гармоник.

В последующем система уравнений (2) и её реализация в виде блок-схемы (рис. 2) были применены для апробации расчётной модели при оценке влияния условий эксплуатации на точностные характеристики ТТ.

Апробация расчетной модели. Далее приведены примеры по апробации расчетной модели применительно к условиям эксплуатации, характеризующимся такими влияющими на точностные характеристики ТТ факторами, как несинусоидальность измеряемого тока и наличие остаточной намагниченности магнитопровода.

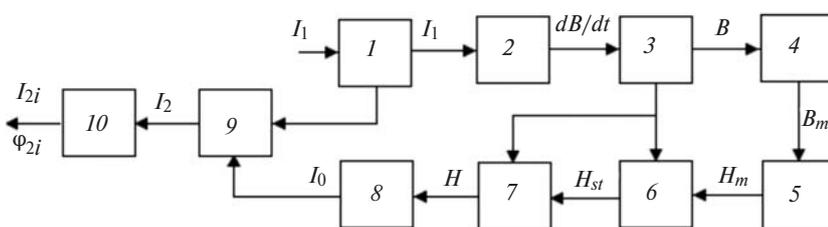


Рис. 2. Блок-схема решения системы уравнений (2)

1. Влияние несинусоидальности измеряемого тока на погрешности измерения. Как отмечено ранее, первичный измеряемый ток в условиях эксплуатации, как правило, несинусоидальный со сложным гармоническим составом, формируемым, например, производственными процессами. Измерение значений тока искаженной формы – трудная задача. Попытка ее решения была предпринята уже в 30-х годах прошлого столетия в [13]. В ней исследовано влияние на погрешности измерения тока 3-й гармоники (180 Гц) при ее амплитудах на уровне до 20 % и сдвигах по фазе 0 и 180° относительно параметров основной гармоники (60 Гц). В этой работе было установлено, что наибольшее влияние оказывает 3-я гармоника на изменения погрешностей в случаях, когда она синфазна с основной («flat top») и при сдвиге фазы на 180° («peaked»). Погрешности трансформатора при синусоидальной форме («sinusoidal») тока занимают промежуточное положение между погрешностями для этих двух случаев.

Для проверки работоспособности расчетной модели была выполнена сравнительная оценка результатов исследования влияния 3-й гармоники на погрешности измерения тока I_1 по данным, заимствованным из [13] и получаемым с применением расчетной модели (при основной гармонике 50 Гц). На рис. 3 приведены сравнительные зависимости для такой оценки.

Для удобства выполнения сравнительной оценки по оси абсцисс на графиках отложены значения вторичного тока I_2 , а по оси ординат – значения отношения $I_1 / (K_n \cdot I_2)$ (K_n – номинальный коэффициент трансформации). Из сравнения графиков на рис. 3 следует, что характер зависимостей экспериментальных погрешностей и рассчитанных подобен. Следует отметить, что количественное сравнение расчётных и экспериментальных зависимостей затруднено из-за неполноты данных по трансформаторам, используемым в [13]. Приемлемое сходство приведенных зависимостей получено при параметрах расчетной модели: $S = 44 \text{ см}^2$; $l = 0,36 \text{ м}$; $2d = 0,5 \text{ мм}$; $m_a = 1210$; $b = 50 \text{ м/А}$; $g = 2 \text{ (Омжл)}^{-1}$; $r = 80 \text{ Ом/м}$; $R_2 = 0,3 \text{ Ом}$; $R_{w2} = 0,2 \text{ Ом}$; $L_2 = 4 \text{ мГн}$ ($L_2 = L_p + L_{2n}$, где L_p – индуктивность рассеяния, равная 4 мГн; L_{2n} – индуктивность номинальной нагрузки, равная 0); $I_1 = 2000 \text{ А}$; $I_2 = 5 \text{ А}$; $W_n = 1$; $W_2 = 397$; $W_n = 400$.

Полученные сходственные результаты могут служить подтверждением работоспособности предлагаемой нами расчетной модели.

Дальнейшее развитие экспериментальных исследований по влиянию

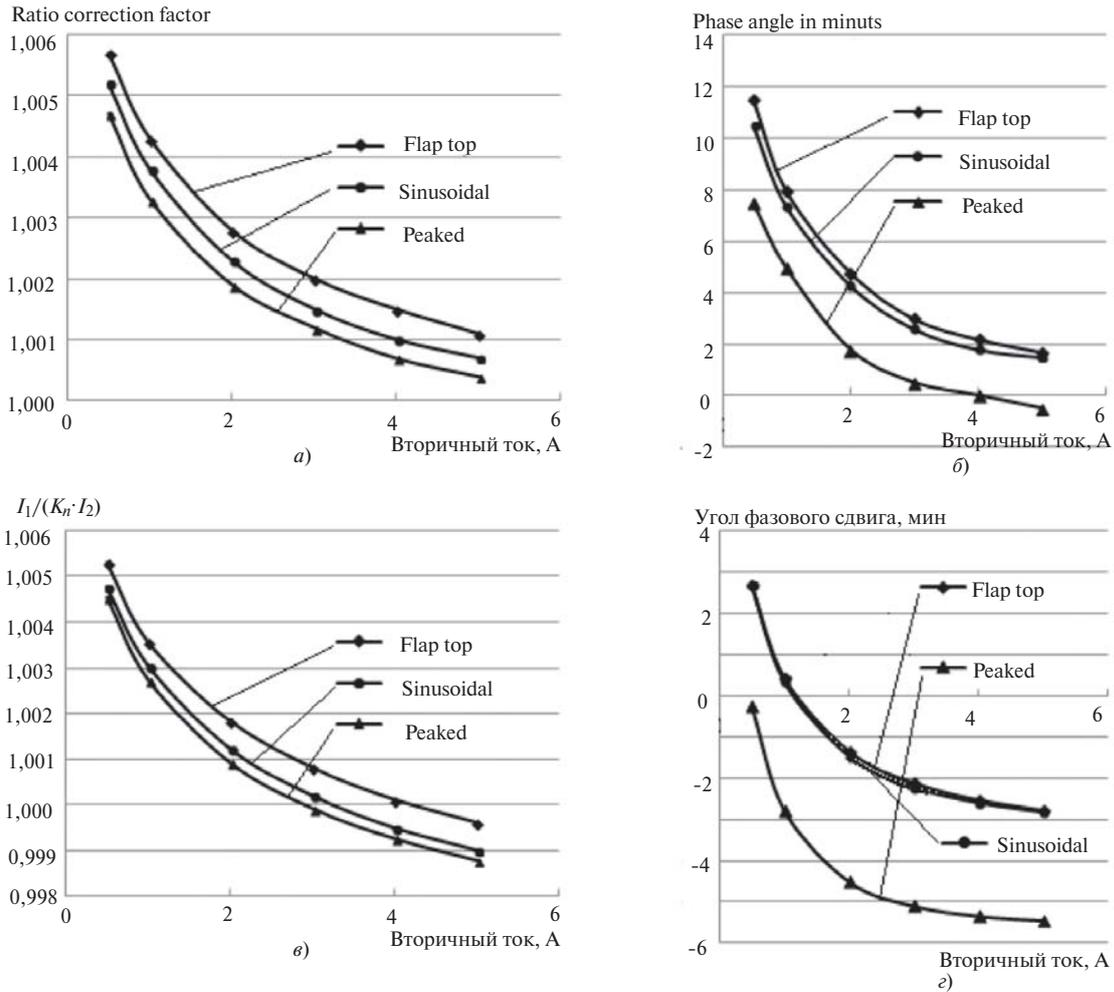


Рис. 3. Зависимости относительного изменения вторичного тока и угловой погрешности от вторичного тока: а, б – по данным [13]; в, г – по расчетной модели

высших гармоник (3, 5 и 7-й) первичного тока на погрешность его измерения изложено в [12]. Наибольшие изменения погрешностей, как и следовало ожидать, приходится на 3-ю гармонику. Дополнительная проверка работоспособности расчетной модели проиллюстрирована на рис. 4, где приведе-

ны зависимости погрешностей для 3-й гармоники от разности фаз между основной и 3-й гармониками. Данные взяты из [12] (эксперимент) и получены расчётом по предлагаемой модели. Из рис. 4 видно, что характер получаемых по модели расчётных кривых погрешностей для 3-й гармони-

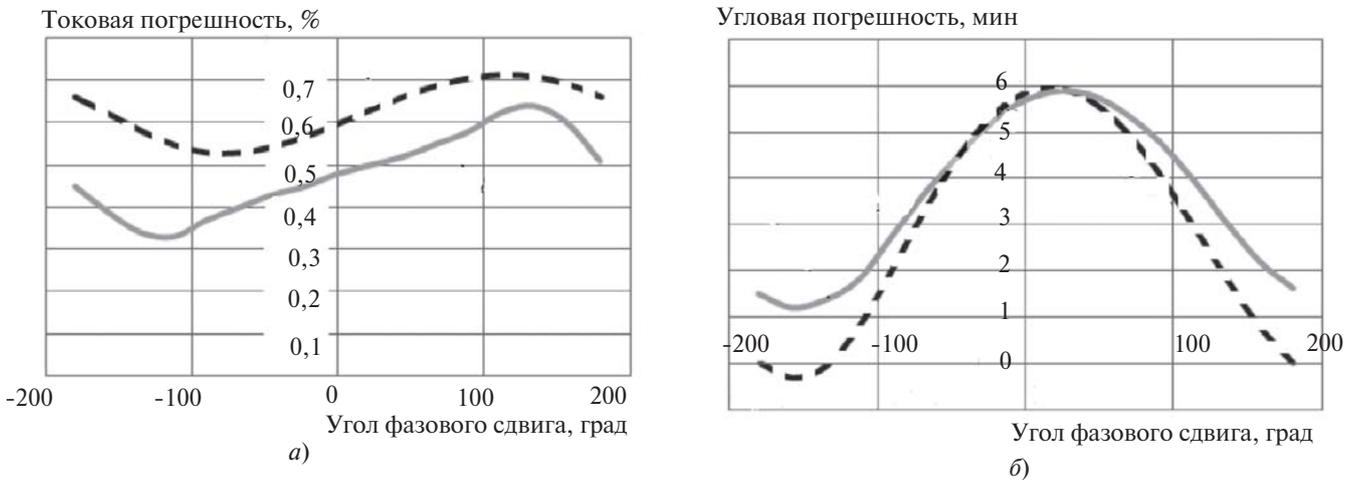


Рис. 4. Сравнительные результаты оценок влияния фазового угла 3-й гармоники на токовую (а) угловую (б) погрешности ТТ для этой гармоники: - - - - расчет; — — эксперимент

ки приемлемо согласуется с экспериментом. Смещение кривых по оси ординат для токовой погрешности можно объяснить возможной витковой коррекцией трансформатора, используемого в [12]. Удовлетворительное согласие результатов сравнительных оценок достигнуто при параметрах расчетной модели, таких же, как и применительно к работе [13], но при отсутствии индуктивности рассеяния ($L_p = 0$). Схожесть сравнительных результатов свидетельствуют о приемлемой эффективности предлагаемой расчетной модели.

Предлагаемая модель позволяет оценить влияние и других гармоник: 5-й, 7-й и т.д. Однако, так же как и в [13], из-за недостаточности данных по ТТ, используемых в [12], корректную сравнительную оценку результатов эксперимента и расчета провести затруднительно.

2. Влияние остаточной намагниченности на погрешность синусоидального измеряемого тока. Остаточная намагниченность приводит к смещению частной динамической петли гистерезиса перематывания материала магнитопровода, например вверх по оси магнитной индукции. Это смещение может сохраняться длительное время, и его заранее определить не представляется возможным из-за непредсказуемости параметров воздействия. Функционирование ТТ при наличии остаточной намагниченности даже при синусоидальном измеряемом токе может привести к значительному неконтролируемому росту погрешностей измерений, что вызывает необходимость их оценки. Причем для обеспечения надежности оценок ограничимся предельным случаем, когда остаточная намагниченность возникает в условиях намагничивания магнитопровода по петле гистерезиса, близкой к предельной, так что эта намагниченность будет максимальной и предсказуемой, а магнитные свойства становятся наихудшими. Как правило, петли гистерезиса запи-

сываются в координатах $B = f(H)$. Связь между намагниченностью и магнитной индукцией выражается для магнитопровода кольцевого типа известной формулой, которую применительно к остаточной намагниченности J_r можно записать в виде

$$J_r = \frac{(\mu - 1)B_r}{\mu_0 \mu}, \quad (4)$$

где μ — магнитная проницаемость материала магнитопровода; B_r — остаточная магнитная индукция.

Сравнительные оценки влияния остаточной намагниченности на рост погрешностей, получаемых экспериментально и путем расчета по модели, позволяют дополнительно проверить её работоспособность. Эксперименты проводились при использовании установки высшей точности типа УВТ 82-А-93 на типовом трансформаторе тока ТОЛ-10 (класс точности 0,5), в котором в качестве материала магнитопровода используется электротехническая сталь 3408. На рис. 5,а приведены полученные при синусоидальном первичном токе экспериментальные динамические петли гистерезиса для разных магнитных состояний стали.

Частные динамические петли гистерезиса 1 и 2 соответствуют размагниченному и намагниченному состоянию стали, получаемому после плавного снижения постоянного магнитного поля напряженностью 100 А/м до нуля. Кривая 3 является нисходящей ветвью статической петли гистерезиса, близкой к предельной. Из анализа рис. 5,а следует, что петля 2 заметно смещена по оси B и повернута по часовой стрелке относительно петли 1. Для большей наглядности различий между петлями последние представлены в совмещенном виде на рис. 5,б. Из анализа рис. 5,б следует, что расхождение между экспериментальными и расчетными петлями гистерезиса согласуются между собой в

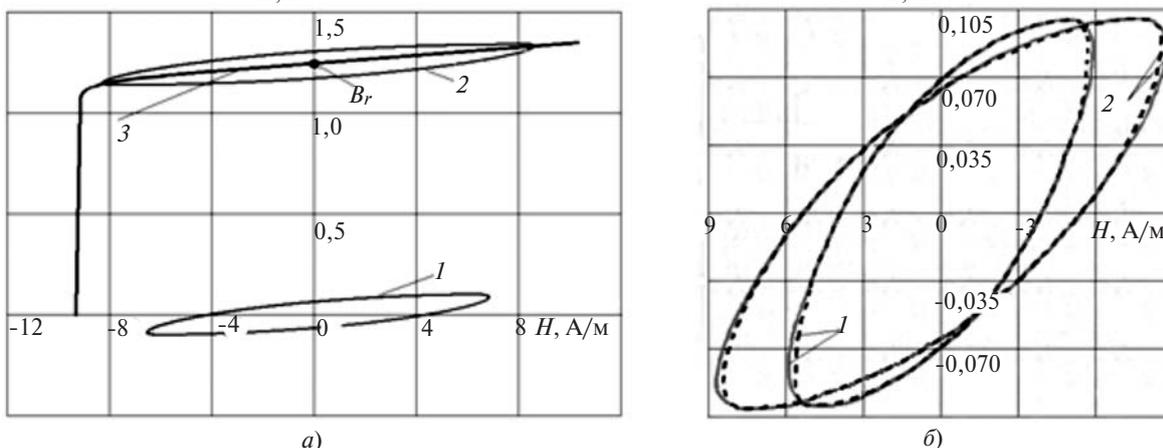


Рис. 5. Динамические частные петли гистерезиса магнитопровода из стали 3408 в размагниченном (1), намагниченном состоянии (2) и нисходящая ветвь кривой, близкой к предельной статической петле гистерезиса (3) (а) и совмещенные частные динамические петли гистерезиса 1 и 2 (б): — — эксперимент; - - - - расчет

пределах не более 3%, что приемлемо для выполняемых исследований.

В результате применения расчетной модели при варьировании параметров модели Релея (μ_a ; b) и коэффициента магнитной вязкости r были получены следующие основные данные для исследуемого трансформатора ТОЛ-10: $S = 7 \text{ см}^2$; $l = 0,37 \text{ м}$; $2d = 3 \text{ мм}$; $m_a = 1920$; $b = 2800 \text{ м/А}$; $g = 2 \text{ (Омж)}^{-1}$; $r = 21 \text{ Ом/м}$; $R_2 = 04 \text{ Ом}$; $R_{w2} = 0,12 \text{ Ом}$; $L_2 = 0,94 \text{ мГн}$ ($L_2 = L_p + L_{2n}$, где L_p – индуктивность рассеяния, равная 0; L_{2n} – индуктивность номинальной нагрузки, равная 0,94 мГн); $I_1 = 150 \text{ А}$; $I_2 = 5 \text{ А}$; $W_1 = 4$; $W_2 = 120$; $W_n = 120$.

Далее приведены экспериментальные (числитель) и расчётные (знаменатель) результаты исследования влияния остаточной намагниченности, соответствующей техническому насыщению магнитопровода, на погрешности трансформатора [19] [магнитопровод (марка стали 3408) предварительно был намагничён постоянным полем $H = 100 \text{ А/м}$]: отношение значений рабочего и номинального токов $I/I_n = 74/74$ (%); при размагниченном магнитопроводе $d = -0,32 / -0,31$ (%), $Q = 3,8/4,2$ (мин); при номинальном – $d = -0,42 / -0,45$ (%), $Q = 6,2/6,8$ (мин).

Если в размагниченном состоянии $m_a = 1920$; $b = 2800 \text{ м/А}$; $r = 21 \text{ Ом/м}$, то в намагниченном состоянии согласно релейской модели для частной динамической петли гистерезиса значения μ_a , b и r будут составлять соответственно: 120, 1250 м/А и 20,5 Ом/м. Следует отметить, что остаточная намагниченность за время эксперимента (сутки) не изменялась, что подтверждалось сохранением параметров петель гистерезиса до тех пор, пока магнитопровод не был специально размагничен. Состояние магнитопровода с остаточной намагниченностью, в особенности для сердечника замкнутой формы, достаточно стабильное. В [1, 20] отмечено, что магнитопровод ТТ может сохраняться в намагниченном состоянии длительное время, вероятно, вплоть до очередного аварийного режима электросети.

Из приведенных данных следует, что экспериментальные и расчетные данные согласуются между собой в пределах не более 3% по токовой погрешности и не более 10% по угловой погрешности, что может служить подтверждением работоспособности предлагаемой расчетной модели. Экспериментальные и расчетные по модели данные согласованно показывают существенное влияние остаточной намагниченности на погрешности измерений, причем при слабой зависимости от нагрузки. При $I/I_n = 74\%$ наблюдается заметный рост погрешности за счёт влияния намагниченности, что приводит к возникновению эксперимен-

тальной дополнительной погрешности, которая составила для токовой примерно 30 %, а для угловой погрешности достигла 50%. Такое возрастание токовой и угловой погрешностей за счет влияющих факторов может даже снизить нормируемый класс точности ТТ.

Заключение. Предлагаемая нелинейная расчетная модель позволяет учитывать влияние несинусоидальности измеряемого тока и остаточной намагниченности магнитопровода на точностные характеристики электромагнитных трансформаторов тока (ТТ).

Применение модели обеспечивает более достоверную оценку точностных характеристик ТТ с учетом влияния условий эксплуатации. Предложенная модель может быть использована для оценки точностных характеристик широкой гаммы ТТ, включая ТТ, в которых при изготовлении магнитопровода использованы более современные магнитные материалы, такие как аморфные и нанокристаллические магнитные сплавы [21], в том числе подвергнутые термомангнитной обработке по специальному режиму [22]. На основе предлагаемой нелинейной расчётной модели могут быть разработаны общий метод и методика для оценки точностных характеристик конструируемых ТТ с учётом их параметров и условий эксплуатации, что позволит оптимизировать их параметры и существенно повысить эффективность применения ТТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М., Сирота И.М., Стогний Б.С. Трансформаторы тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1989, 416 с.
2. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
3. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств.
4. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
5. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
6. ГОСТ 8.217-2003. (СТ СЭВ 5644-86) ГСИ. Трансформаторы тока. Методика поверки.
7. ГОСТ Р 8.859-2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока. – М: Стандартинформ, 2014, 8 с.
8. Савина Н.В., Сухомесов М.А. Влияние качества электроэнергии на погрешности трансформаторов. – Электричество, 2008, № 11, с. 6–13.
9. Рудевич Н.В. Погрешности трансформаторов тока при несинусоидальных токах. – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011, № 41, с. 111–117.
10. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.

11. **IEC 6100-4.7**: 2009. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4–7. Методы испытаний и измерений. Общее руководство по измерениям гармоник и интергармоник и измерительным приборам для систем электроснабжения и подключаемого к ним оборудования.

12. **Cataliotti A., Cara D., Emanuel A., Nuccio S.** A novel approach to current transformer characterization in the presence of harmonic distortion. — *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, No. 5, pp. 1446–1450.

13. **Park J.H.** Effect of wave form upon the performance of current transformers. — *Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1937, November, vol. 19, pp. 519–530.

14. **Вонсовский С.В.** Магнетизм. — М.: Изд-во «Наука», 1971, 1032 с.

15. **Миронюк Н.Е., Попов Э.И.** Расчёт погрешностей измерительных трансформаторов тока. — *Электротехника*, 1982, № 11, с. 17–19.

16. **Кадочников А.И., Миронюк Н.Е.** Область применимости формул Релея и преобразований Кондорского для описания петли гистерезиса электротехнических сталей. — *Электротехника*, 1982, № 9, с. 14–16.

17. **Кадочников А.И.** Теория слабого поверхностного эффекта, учитывающего магнитную вязкость с малым временем релаксации. — *Физика металлов и металловедение*, 1996, т. 83, вып.1, с. 48–58.

18. **Кадочников А.И.** Модификация уравнения магнитной вязкости. — *Физика металлов и металловедение*, 1997, т. 83, вып. 2, с. 86–96.

19. **Миронюк Н.Е., Пудов В.И.** Повышение эффективности работы трансформаторов тока. *Научни известия. Дни на безразрушительния контрол* 2012, 2012, № 1(133), с. 54–57.

20. **Аничкин А.Н., Раскулов Р.Ф., Эткинд Л.Л.** Применение встроенных трансформаторов тока. — *Электро*, 2005, № 6, с. 42–45.

21. **Гуртовцев А.Л.** Измерительные трансформаторы: Проблемы нижней границы вторичной нагрузки. — *Новости электротехники*, 2008, № 2 (50), с. 170–174.

22. **Пудов В.И., Соболев А.С.** Терромагнитная обработка изделий из аморфного сплава. — *Труды XVII Международной конференции. Физика прочности и пластичности материалов*, Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2009, т. II, с. 35–37.

[25.05.15]

А в т о р ы: **Миронюк Николай Ефимович** — главный специалист Института физики металлов Уральского отделения Российской Академии наук (ИФМ УО РАН), канд. техн. наук.

Соболев Анатолий Сергеевич — доцент, старший научный сотрудник ИФМ УО РАН, канд. физ.-мат. наук.

Пудов Владимир Иванович — заведующий лабораторией ИФМ УО РАН, канд. физ.-мат. наук.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp. 19–28.

Calculation Model for Estimation Accuracy of Characteristics of Electromagnetic Transformers of the Current

MIRONYUK Nikolay Yefimovich (*Institute Physics of Metal (IPhM), Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*) — *Chief Specialist, Cand. Sci. (Eng.)*

SOBOLEV Anatolii Sergeevich (*IPhM, Yekaterinburg, Russia*) — *Senior Scientific Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)*

PUDOV Vladimir Ivanovich (*IPhM, Yekaterinburg, Russia*) — *Head of the Department, Cand. Sci. (Phys.-Math.)*

The nonlinear model for estimation of errors (the basic and additional errors), electromagnetic transformers of the electric current taking into consideration conditions of their use, is developed and approved. Conditions are characterised nonsinusoidal an electric current and residual magnetisation of a nonlinear element - ferromagnetic magnetic conductor. For ferromagnetic magnetic conductor effective functioning of model is based on use of experimental dynamic loops of a hysteresis. Model allows to consider conditions of uses of transformers of a current at their estimation actual accuracy characteristics which can differ from norm of characteristics for the given class of accuracy of transformers of a current. On the basis of offered nonlinear model the general method and a technique can be developed for an estimation of the metrological characteristics of designed transformers of a current. Parametres of transformers of a current and use condition are considered. It will allow to optimize parametres of transformers of an electric current to improve efficiency.

Key words: *current transformers, calculation model, accuracy characteristic, accuracy class, nonsinusoidal electric current*

REFERENCES

1. **Afanas'yev V.V., Adon'yev N.M., Kibel' V.M., Sirota I.M., Stognii B.S.** *Transformatory toka* (Current Transformers). Leningrad, Publ. Energoatomizdat, 1989, 416 p.

2. **RMG 29–2013.** *Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* (Metrology. Basic terms and defenitions).

3. **GOST 8.009-84.** *Normiruyemye metrologicheskiye kharakteristiki sredstv* (State Standard 8.009-84 Standardized metrological characteristics of means).

4. **GOST 22261-94.** *Sredstva izmerenii elektricheskikh i magnitnykh velichin. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* (State Standard 22261-94. Means of measuring electric and magnetic values. General specification).

5. **GOST 7746-2001.** *Transformatory toka* (State Standard 7746-2001 Current Transformers).
6. **GOST 8.217-2003. (ST SEV 5644-86) GSI.** *Transformatory toka. Metodika proverki* (Current Transformers. Testing Procedure).
7. **GOST R 8.859-2013. GST.** *Gosudarstvennaya poverochnaya schema dlya sredstv izmerenii koeffitsienta i ugla masshtabnogo preobrazovaniya sinusoidal'nogo toka* (GOST R 8.859-2013. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. State Verification Schedule for Measuring Instruments of Current Ratio and Phase Displacement for Sinusoidal Current). Moscow, Standartinform, 2014, 8 p.
8. **Savina N.V., Sukhomesov M.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 11, pp. 6–13.
9. **Rudevich N.V.** *Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu «Khar'kovskii politekhnichnii institut» – in Ukrainian (Bulletin of the National Technical University «Khar'kov Polytechnic Institute»*, 2011, No. 41, pp. 111–117.
10. **GOST 30804.4.7-2013.** *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Obshcheye rukovodstvo po sredstvam izmerenii i izmereniyam garmonik i intergarmonik dlya system elektroobrazovaniya i podklyuchayemykh k nim tekhnicheskikh sredstv* (GOST 30804.4.7-2013 Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. General Guide on Harmonics and Interharmonics Measuring Instruments and Measurement, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto).
11. **IEC 6100-4.7: 2009.** *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.*
12. **Cataliotti A., Cara D., Emanuel A., Nuccio S.** A novel approach to current transformer characterization in the presence of harmonic distortion. – *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, 2009, vol. 58, No. 5, pp. 1446–1450.
13. **Park J.H.** Effect of wave form upon the performance of current transformers. – *Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1937, November, vol. 19, pp. 519–530.
14. **Vonsovskii S.V.** *Magnetizm* (Magnetism). Moscow, Publ. «Nauka», 1971, 1032 p.
15. **Mironyuk N.Ye., Popov E.I.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1982, No. 11, pp. 17–19.
16. **Kadochnikov A.I., Mironyuk N.Ye.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1982, No. 9, c. 14–16.
17. **Kadochnikov A.I.** *Fizika metallov i metallovedeniye – in Russ. (Physics of Metals and Metallography)*, 1996, vol. 83, iss.1, pp. 48–58.
18. **Kadochnikov A.I.** *Fizika metallov i metallovedeniye – in Russ. (Physics of Metals and Metallography)*, 1997, vol. 83, iss. 2, pp. 86–96.
19. **Mironyuk N.Ye., Pudov V.I.** *Nauchni izvestiya – in Ukrainian (Research News)*, 2012, No. 1(133), pp. 54–57.
20. **Anichkin A.N., Ruskulov R.F., Etkind L.L.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2005, No. 6, pp. 42–45.
21. **Gurtovtsev A.L.** *Novosti elektrotekhniki – in Russ. (News of Electrical Engineering)*, 2008, No. 2 (50), pp. 170–174.
22. **Pudov V.I., Sobolev A.S.** *Trudy XVII Mezhdunarodnoi konferentsii «Fizika prochnosti i plastichnosti materialov» in Proceedings of the 17th International Conference «Physics of Materials Strength and Plasticity»*, Samara University). Samara, Publ. Samara University, 2009, vol. II, pp. 35–37.