

УДК 621.314

Б.С.СТОГНИЙ, академик НАН Украины, Е.Н.ТАНКЕВИЧ, докт.техн.наук, Г.М.ВАРСКИЙ, канд.техн.наук, И.В.ЯКОВЛЕВА, канд.техн.наук, (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), С.В.РЯБЧУК (ОАО "Укрэлектр-аппарат", Хмельницкий)

Математическая модель измерительного преобразователя тока на новых магнитных материалах

Исследованы магнитные характеристики ленточного кольцевого магнитопровода из нанокристаллического сплава ММ-11 и построена математическая модель трансформатора тока с таким магнитопроводом в виде структурной схемы следящей системы. С учетом полученных результатов исследований рассчитан и изготовлен трансформатор тока с заданным минимальным значением номинального коэффициента безопасности приборов его вторичной обмотки. Экспериментально подтверждено соответствие его метрологических характеристик заданным значениям.

Досліджено магнітні характеристики стрічкового кільцевого магнітопровода з нанокристалічного сплаву ММ-11 і побудовано математичну модель трансформатора струму з таким магнітопроводом у вигляді структурної схеми слідуючої системи. З урахуванням отриманих результатів досліджень розраховано і виготовлено трансформатор струму із заданим мінімальним значенням номінального коефіцієнта безпеки приладів його вторинної обмотки. Експериментально підтверджено відповідність його метрологічних характеристик заданим значенням.

Повышение эффективности энергетического производства в большой мере определяется уровнем и качеством его информационного обеспечения, главенствующая роль в котором принадлежит системе измерений параметров режимов электроэнергетических объектов. Трансформаторы тока (ТТ) принадлежат к основному электрооборудованию электрических сетей и являются самыми массовыми и ответственными компонентами систем учета электроэнергии, систем диспетчерского управления, релейной защиты и автоматики. Именно они вносят определяющий вклад в образование погрешности передачи измерительной информации от контролируемой электрической сети к упомянутым системам. Совершенство конструкции, точная и надежная работа измерительных трансформаторов является залогом высокой эффективности функционирования электрических сетей и всей электроэнергетической отрасли в целом.

подавляющее большинство эксплуатируемых в электрических сетях Украины ТТ — это морально устаревшие и физически изношенные средства измерения низких (0,5 и ниже) классов точности. Выпускаемые в настоящее время ТТ также имеют ряд существенных недостатков: значительную материалоемкость, большую потребность в энергоресурсах в процессе их производства, высокую стои-

мость и эксплуатационные расходы.

Применение аморфных и нанокристаллических магнитных материалов открывает новые возможности при построении измерительных ТТ с уникальными метрологическими характеристиками (МХ) и массогабаритными показателями. Эти материалы отличаются чрезвычайно высокой магнитной проницаемостью, низкими потерями на перемагничивание и вихревые токи, низким значением остаточной индукции и достаточно высоким значением индукции насыщения.

Высокая магнитная проницаемость таких магнитопроводов позволяет разрабатывать ТТ с одновитковой первичной обмоткой класса точности 0,2S и выше даже для небольших значений первичного тока. Это упрощает конструкцию ТТ, уменьшает материалоемкость трансформатора и его габаритные размеры. Это, в свою очередь, уменьшает паразитные параметры ТТ — его паразитную индуктивность и емкость, что улучшает частотные и динамические свойства трансформатора. Низкие магнитные потери также способствуют расширению частотного диапазона ТТ.

Низкое значение остаточной индукции в магнитопроводах из аморфных и нанокристаллических сплавов обеспечивает работу ТТ без существенного увеличения погрешностей после намаг-

ничивания трансформатора аperiodической составляющей тока во время работы в переходном режиме. ТТ с сердечниками из электротехнической стали после такого воздействия могут десятками часов работать с повышенной погрешностью, значительно превышающей допустимые пределы. Точность ТТ на новых магнитных материалах возобновляется сразу после прекращения аварийного режима, обеспечивая высокую достоверность и надежность учета электроэнергии в послеаварийном периоде.

В условиях широкого внедрения в электроэнергетику микропроцессорных измерительных устройств становится актуальной проблема защиты последних от суртов, возникающих в аварийных режимах работы энергосистемы. Аварийные токи приводят к увеличению погрешностей измерительных приборов за счет перегрузки их входных цепей, снижают точность учета электроэнергии, а также могут привести к выходу из строя электронного оборудования, подключенного ко вторичным цепям ТТ. С целью предотвращения отмеченных явлений стандарт [3] предписывает устанавливать в качестве одного из основных параметров ТТ для измерений значение номинального коэффициента безопасности приборов, подключенных ко вторичной стороне ТТ ($K_{\text{Бном}}$). Последний определяется как отношение минимального значения первичного тока ТТ, при котором полная погрешность при номинальной вторичной нагрузке составляет не менее 10 %, к номинальному первичному току ТТ.

Традиционные измерительные ТТ с магнитопроводами из электротехнической стали проектировались исходя из условия обеспечения заданной точности с учетом ограничений на размеры магнитопровода, определяемых классом напряжения. Поэтому требования к номинальному коэффициенту безопасности приборов не выдвигались ввиду их невыполнимости. Величина коэффициента безопасности приборов у таких ТТ находилась на уровне 10—15 и выше, она считалась второстепенным параметром и определялась для уже рассчитанных размеров магнитопровода ТТ.

Новые магнитные материалы позволяют найти приемлемое решение и в этом случае. Индукция технического насыщения магнитопроводов из аморфных и нанокристаллических сплавов находится на уровне 1,1—1,2 Тл, а индукция точки перегиба, которая отвечает "колену" на характеристике намагничивания, находится на уровне 0,9—0,95 Тл, что позволяет создавать ТТ с низкими значениями величины номинального коэффициента безопасности приборов вплоть до величин 1,5—2,5. При этом, вторичный ток ТТ ограничивается на безопасном уровне за счет насыщения сердечника, а благодаря низкому значению намагничивающей силы высокая точность ТТ сохраняется практически до достижения первичным током величины тока безопасности.

Одновременное обеспечение заданного номинального коэффициента безопасности приборов и высокого класса точности измерительной обмотки ТТ возможно благодаря наличию в пределах одной марки аморфного или нанокристаллического материала, характеризуемого постоянной величиной индукции насыщения, магнитопроводов разных классов по магнитной проницаемости. Это позволяет рассчитать сечение магнитопровода по индукции насыщения, исходя из условия обеспечения заданного коэффициента безопасности, а заданный класс точности ТТ достигается за счет магнитной проницаемости, то есть использования магнитопровода той же марки и с тем же сечением, но высшего класса по магнитной проницаемости.

При построении математической модели ТТ с сердечником из новых аморфных или нанокристаллических магнитных материалов необходимо учитывать особенности магнитных характеристик последних. Одной из важных магнитных характеристик, используемых при расчете токовых и угловых погрешностей ТТ, является угол магнитных потерь. В аморфных и нанокристаллических магнитных материалах его определение затруднено из-за малой мощности магнитных потерь, по величине которых обычно определяют угол потерь [2]. Определение этого угла на низких частотах даже на образцах с небольшим объемом становится очень сложной задачей. В этом случае целесообразно определять угол потерь по схеме рис. 1 как угол между намагничивающим током (намагничивающей силой) в намагничивающей обмотке $w_{1Н}$ и напряжением на индукционной обмотке $w_{2И}$ (магнитным потоком) с учетом того, что напряжение и магнитный поток сдвинуты относительно друг друга на угол 90° .

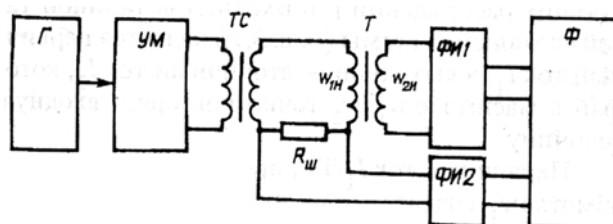


Рис. 1

Сигнал от генератора Г через усилитель мощности УМ и силовой трансформатор ТС поступает на намагничивающую обмотку $w_{1Н}$ исследуемого образца ТТ. Для устойчивой работы фазометра Ф в условиях искаженных форм напряженности и индукции магнитного поля в сердечнике напряжение с индукционной обмотки $w_{2И}$ и шунта $R_{ш}$ поступает на формирователи напряжения прямоугольной формы ФИ1 и ФИ2, фазы выходных напряжений которых соответствуют фазам первых гармоник напряжений, пропорциональных напряженности и индукции магнитного поля в исследу-

емом магнитопроводе.

Предложенный способ позволил исследовать зависимость угла магнитных потерь от индукции (рис. 2) на частоте 50 Гц в магнитопроводах малой массы из новых аморфных и нанокристаллических сплавов с низкими магнитными потерями. На рис. 2 показана такая зависимость для магнитопровода из сплава ММ-11Н.

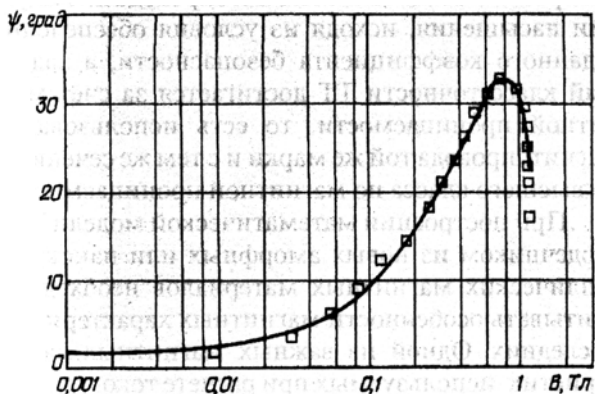


Рис. 2

Полученные зависимости были использованы при расчетах токовых и угловых погрешностей ТТ на новых магнитных материалах, а также для определения мощности и сопротивления потерь, используемых при построении математических моделей трансформаторов в виде структурных схем следящих систем. Это позволило более точно рассчитать параметры математических моделей и погрешности ТТ.

Структурная схема электромагнитного ТТ как следящей системы (системы автоматического регулирования) может быть построена исходя из следующих рассуждений [1]. Входной величиной такой следящей системы (рис. 3, а) является первичный ток I_1 , а выходной — вторичный ток I_2 , который в масштабе w_1/w_2 точно повторяет входную величину.

Первичный ток I_1 ТТ, протекая по первичной обмотке w_1 , создает первичную магнитодвижущую силу (МДС) $F_1 = I_1 \cdot w_1$. На структурной схеме это отображается звеном W1 с коэффициентом передачи w_1 , входной величиной которого является первичный ток I_1 , а выходной — МДС F_1 . Вторичный ток I_2 ТТ, который проходит по вторичной обмотке w_2 , создает вторичную МДС $F_2 = I_2 \cdot w_2$, что отображается на схеме звеном W8 с коэффициентом передачи w_2 . Первичная F_1 и вторичная F_2 МДС направлены навстречу друг другу в магнитопроводе трансформатора. Результирующая МДС, которая равняется разности между F_1 и F_2 , называется полной МДС намагничивания $F_0 = I_0 \cdot w_1$, где I_0 — ток намагничивания. Это отображается на схеме первым сумматором (узлом сравнения или вычитания). Под действием намагничивающей силы F_0 в сер-

дечнике ТТ создается напряженность магнитного поля $H_0 = l^{-1} \cdot F_0 = (I_0 \cdot w_1) / l$ (звено W2 с коэффициентом передачи $1/l$), где l — длина средней магнитной линии сердечника трансформатора. Напряженность магнитного поля H_0 создает в сердечнике ТТ индукцию (звено W3 с коэффициентом передачи μ), где μ — абсолютная магнитная проницаемость сердечника ТТ, и поток намагничивания $\Phi_0 = B \cdot S = (\mu \cdot S \cdot w_1 \cdot I_0) / l$ (звено W4 с коэффициентом передачи S), где S — площадь поперечного сечения сердечника ТТ. Поток намагничивания Φ_0 , пронизывая витки вторичной обмотки, создает потокосцепление $\Psi = \Phi_0 \cdot w_2$ (звено W5 с коэффициентом передачи w_2). Во вторичной обмотке w_2 возникает электродвижущая сила $E_2 = -\frac{d}{dt} \cdot \Psi = -p \cdot w_2 \cdot \Phi_0$ (звено W6, которое отображает оператор дифференцирования, то есть дифференцирующее звено), где p — оператор Лапласа. Напряжение E_2 вызывает во вторичной обмотке w_2 ТТ вторичный ток I_2 , который состоит из суммы токов: тока $I_H = E_2 \cdot Z_H^{-1}$ в нагрузке Z_H и тока $I_C = E_2 \cdot pC_2$ — в собственной емкости вторичной обмотки w_2 . На структурной схеме это показано соответствующим звеном W7 с коэффициентом передачи $1/Z_H$, звеном W10 с коэффициентом передачи pC_2 и соответствующим сумматором. Ток I_2 создает на полном сопротивлении вторичной обмотки $Z_{w2} = r_2 + pL_{S2}$, где r_2 — внутреннее сопротивление вторичной обмотки, а L_{S2} — ее индуктивность рассеивания, падение напряжения, которое уменьшает прикладываемое к Z_H и C_2 напряжение. На структурной схеме это показано звеном W9 и соответствующим сумматором, которые создают местную отрицательную обратную связь, уменьшая напряжение E_2 . В сопротивлении потерь

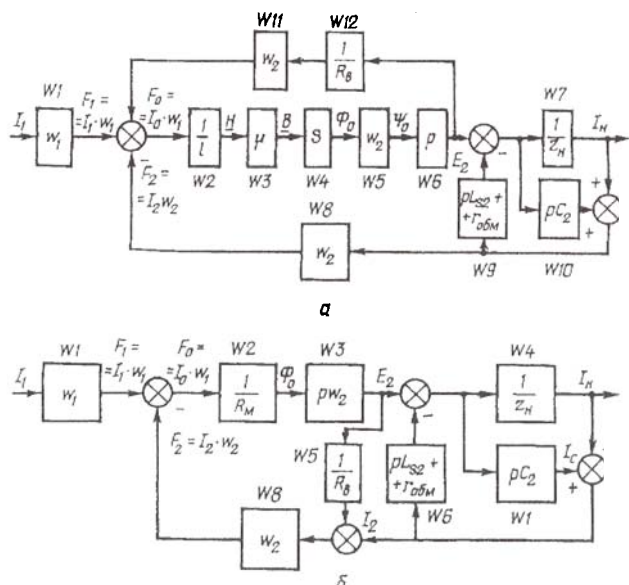


Рис. 3

R_B под действием напряжения E_2 протекает ток I_B , который увеличивает погрешность ТТ. На структурной схеме этому отвечают звенья W11, W12 и первый сумматор.

Таким образом, исходя из общих рассуждений, построена структурная схема (рис. 3, а) электромагнитного ТТ как следящая система с учетом паразитных параметров вторичной обмотки и сопротивления потерь сердечника. Пользуясь правилами упрощения структурных схем, преобразуем ее к более удобному виду (рис. 3, б). На схеме R_M — магнитное сопротивление сердечника ТТ. В случае кольцевого магнитопровода $R_M = l / (\mu \cdot S)$.

По структурной схеме (рис. 3, б), используя правило Мейсона, получим передаточную функцию ТТ, которая после преобразований будет иметь вид

$$W_{ТТ}(p) = \frac{I_H}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{b_0 p}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3} \quad (1)$$

где

$$a_0 = \frac{L_{S2} L_0 C_2}{R_B}; \quad a_1 = L_0 C_2 + \frac{L_{S2} L_0}{R_B Z_H} + L_{S2} C_2 + \frac{L_0}{R_B} \cdot C_2 r_2;$$

$$a_2 = \frac{L_0}{Z_H} + \frac{L_0}{R_B} + C_2 r_2 + \frac{L_{S2}}{Z_H} + \frac{L_0}{R_B} \cdot \frac{r_2}{Z_H}; \quad a_3 = 1 + \frac{r_2}{Z_H};$$

$$b_0 = L_0 / Z_H; \quad L_0 = (\mu \cdot S \cdot w_2^2) / l$$

Для диапазона частот, в котором можно пренебречь емкостью вторичной обмотки трансформатора, передаточная функция (1) упрощается

$$W_{ТТ}(p) = \frac{I_H}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{b_0 p}{a_1 p^2 + a_2 p + a_3} \quad (2)$$

где изменились только коэффициенты

$$a_1 = \frac{L_0 L_{S2}}{Z_H R_B} \quad \text{и} \quad a_2 = \frac{L_0}{Z_H R_B} (R_B + Z_H + r_2 + \frac{L_{S2}}{L_0} R_B)$$

Если вторичная нагрузка трансформатора имеет индуктивный характер, то передаточная функция ТТ будет иметь вид

$$W_{ТТ}(p) = \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{p T_2}{p^2 T_B T_\Sigma + p [T_2 (1+k) + T_\Sigma] + 1} \quad (3)$$

$$\text{где } T_2 = \frac{L_0}{R_H + r_2}; \quad T_\Sigma = \frac{L_H + L_{S2}}{R_H + r_2}; \quad T_B = \frac{L_0}{R_B}; \quad k = \frac{R_H + r_2}{R_B}$$

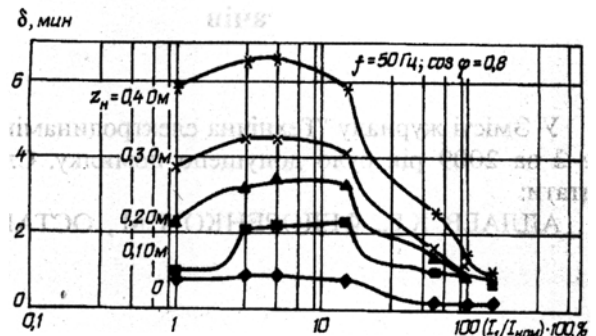
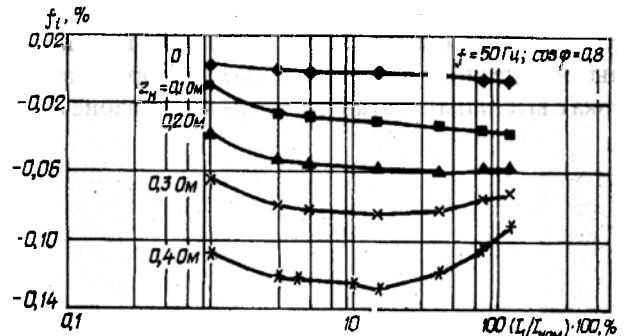
Таким образом, получена передаточная функция ТТ, которая учитывает сопротивление потерь в магнитопроводе трансформатора. В эту функцию входят линейные T_Σ и нелинейные (T_2 и T_B) посто-

янные времени, нелинейность которых определяется нелинейностью индуктивности намагничивания L_0 сердечника трансформатора и нелинейным сопротивлением потерь R_B . Это сопротивление может быть найдено по известному углу потерь ψ следующим образом:

$$R_B = \frac{2\pi f}{\text{tg}\psi} \cdot \mu_0 \mu_a \cdot \frac{\eta S}{l} \cdot w_2^2, \quad (4)$$

где f — частота первичного тока; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; μ_a и η — относительная магнитная проницаемость и коэффициент заполнения сечения сердечника ТТ материалом.

На основе проведенных исследований разработана методика расчета конструктивных параметров электромагнитной системы ТТ, которая позволяет проектировать измерительные трансформаторы с заданным номинальным коэффициентом безопасности приборов и заданным высоким классом точности. По этой методике были рассчитаны и изготовлены экспериментальные образцы ТТ на номинальные токи 300 и 1000 А с номинальным коэффициентом безопасности приборов 2,5 и 1,5 соответственно. Комплекс исследований и испытаний изготовленных экспериментальных образцов ТТ подтвердил их высокие метрологические характеристики и адекватность использованных математических моделей и методик расчета. На рис. 4 и рис. 5 показаны зависимости токовой и угловой



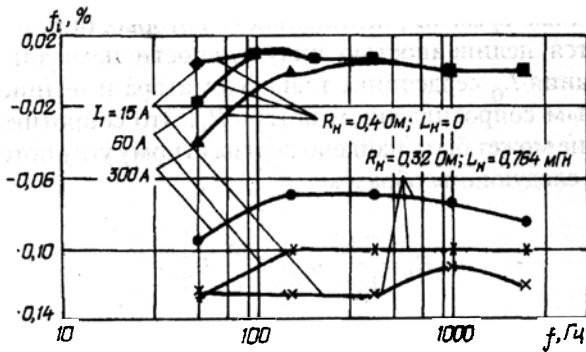


Рис. 6

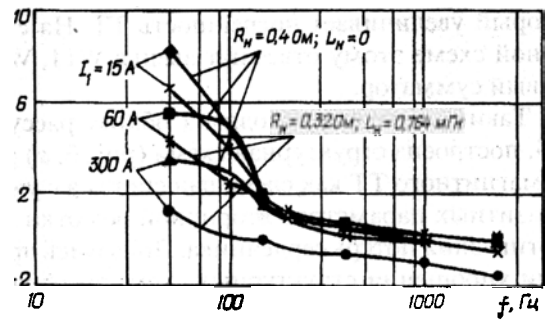


Рис. 7

погрешностей ТТ 300/5 А для разных значений нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ (номинальная мощность нагрузки $S_{2\text{ном}} = 10 \text{ VA}$) от величины первичного тока. Рис. 6 и рис. 7 демонстрируют зависимости токовой и угловой погрешностей этого же трансформатора от частоты первичного тока для разных значений тока и нагрузки.

Выводы. Применение аморфных и нанокристаллических магнитных материалов в ТТ уменьшает их погрешности, расширяет частотный диапазон измерений тока, повышает стабильность МХ в частотном и временном диапазонах и, таким образом, повышает точность, надежность и достоверность получаемой от ТТ информации.

Предложенные математическая модель и методика расчета конструктивных параметров электромагнитной системы ТТ составляют научно-техническую основу проектирования высокоточных и надежных измерительных преобразователей тока с высокими и стабильными в диапазоне изме-

рения и во времени метрологических характеристиками, полностью отвечающих требованиям международных стандартов. Это позволит значительно повысить конкурентоспособность украинских разработок и увеличить их экспортный потенциал.

1. Варський Г.М. Вимірвальні перетворювачі струму з електронною компенсацією похибки для електроенергетики та електротехнологічних установок / Дис... канд. техн. наук: 05.14.02. — Київ, 2007. — 189 с.

2. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. — М.: Энергия, 1969. — 360 с.

3. ДСТУГОСТ 7746-2003 (ГОСТ 7746-2001, IDT). Трансформатори струму. Загальні техн. умови. / Надано чинності з 01.07.2003. — Київ.: Держспоживстандарт України, 2003. — 30с.

Надійшла 16.01.2009

До уваги читачів

У Змісті журналу "Технічна електродинаміка" № 2 за 2009 рік було допущено помилку. Слід читати:

АЛЛАЕВ К.Р., ФЕДОРЕНКО Г.М., ОСТАП-

ЧУК Л.Б. "Асинхронные турбогенераторы в электроэнергетических системах".

Редакція приносить свої вибачення авторам статті.