

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СОСТАВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

THE USE OF AIR TRANSFORMER IN THE MEASURING CURRENT TRANSFORMERS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

M. Kazakov

Summary. The article proposes to use a device based on the air transformer (Rogovsky belt) and an integrator to measure alternating currents of industrial frequency in the electric power industry. The errors introduced by the Rogovsky belt due to its difference from the ideal integrating circuit are investigated, the ways of their reduction are considered.

Keywords: air transformer, air transformer, Rogovsky belt, measurement, measuring transducer, current transformer, integrator.

Казакوف Михаил Константинович

*Д.т.н., профессор, Гжельский государственный университет
vokazak.m@gmail.com*

Аннотация. В статье предложено для измерения переменных токов промышленной частоты в электроэнергетике использовать устройство на основе воздушного трансформатора (пояса Роговского) и интегратора. Исследованы погрешности, вносимые поясом Роговского вследствие его отличия от идеального интегрирующего контура, рассмотрены пути их снижения.

Ключевые слова: воздушный трансформатор, пояс Роговского, измерение, измерительный преобразователь, трансформатор тока, интегратор.

Переменные токи широко используются в электроэнергетике (практически на каждом предприятии в промышленности) и задача их измерения возникает очень часто, например, для учета потребления электроэнергии.

Что касается требований к точности измерений, а, следовательно, к классу измерительных устройств, то они весьма разнообразны. Часто погрешности измерений не должны превышать (0,1...0,5)%, например, при учете потребления электроэнергии и испытаниях электрооборудования. При оперативном контроле электрооборудования точность измерения может быть менее высокой.

В качестве измерительных преобразователей тока (ИПТ) в промышленной электроэнергетике широкое использование нашли индукционные трансформаторы тока (ТТ) на основе ферромагнитного сердечника.

Диапазон значений тока, измеряемых с помощью ТТ весьма широк, причем верхний предел соответствует току 40 кА [1], а вторичный ток обычно составляет 1 или 5 А. Трансформаторы тока используются при напряжениях (0,66...750) кВ согласно ГОСТ 7746–78. При этом трансформаторы для измерения больших токов, включаемые в высоковольтные цепи, имеют значительные габариты и массу: их высота превышает 5 м, а вес достигает 5000 кг.

Среди недостатков ТТ можно упомянуть следующие: а) нелинейная характеристика магнитопровода; б) трудность увеличения верхнего диапазона измерений; в) большая индуктивность обмотки, что способствует весьма значительным перенапряжениям на трансформаторе при возможных нарушениях соединений во вторичной цепи (нормальный режим работы ТТ — короткое замыкание выходной цепи); г) зависимость погрешностей преобразования от сопротивления нагрузки трансформатора (они увеличиваются с ростом этого сопротивления).

Среди альтернативных решений построения ИПТ можно упомянуть магнитооптические ИПТ, которые применяются, главным образом, в установках высокого напряжения [2,3].

Вместе с тем имеется другой путь построения ИПТ в электроэнергетике на основе использования воздушного трансформатора (пояса Роговского) и интегрирующего устройства (рис. 1).

Целью данной работы является анализ некоторых погрешностей измерений, вносимых поясом, что необходимо для обоснования возможности использования такого ИПТ в электроэнергетике.

Пояс (катушка) Роговского представляет собой обмотку, намотанную на неферромагнитном каркасе (ино-

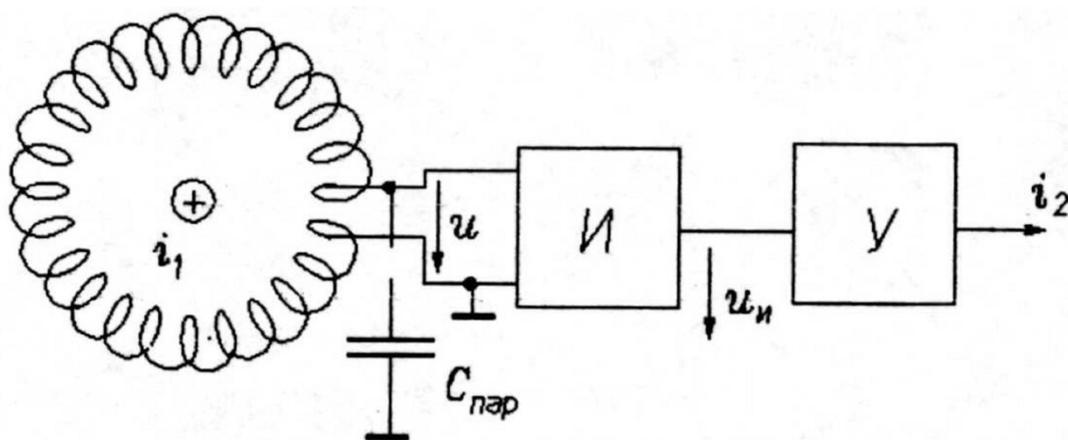


Рис. 1. Схема ИПТ

гда на гибком). Эта обмотка охватывает токопровод с измеряемым переменным током i_1 и на ее выходных клеммах (в режиме холостого хода) мгновенное напряжение равно:

$$u = M \frac{di_1}{dt}, \quad (1)$$

где M — взаимная индуктивность между поясом Роговского и контуром измеряемого тока. Для восстановления прямо пропорциональной зависимости напряжения u нужно проинтегрировать:

$$u_{\text{и}} = \frac{1}{R_0 C_0} \int u dt = \frac{M}{R_0 C_0} i_1, \quad (2)$$

где R_0, C_0 — параметры интегратора И (рис. 1). Мы видим, что мгновенные значения выходного напряжения и измеряемого тока связаны через постоянный коэффициент пропорциональности (константу).

Отметим, что режим холостого хода при работе пояса является предпочтительным (даже необходимым), поскольку в этом случае активное сопротивление обмотки пояса не влияет на коэффициент передачи, что снижает погрешности измерения.

В общем случае в структуру ИПТ необходимо включить усилитель У (рис. 1), поскольку малая мощность выходного сигнала интегратора не позволяет использовать этот сигнал для нужд электроэнергетики, поскольку выше указывалось, что вторичный ток трансформатора тока, вместо которого может использоваться ИПТ, составляет 1...5 А.

Известно применение катушки Роговского в совокупности с пассивным интегратором [4], но у автора нет информации об использовании пояса Роговского в электроэнергетике для измерения токов промышленной частоты.

Это обусловлено тем, что при низких напряжениях вполне удовлетворительно себя зарекомендовали обычные ТТ с ферромагнитным сердечником.

Однако для измерения тока в электроэнергетике, в частности в установках высокого напряжения, описанный способ заслуживает пристального внимания благодаря своей простоте и возможности получения хороших эксплуатационных характеристик. Среди них можно отметить линейность передаточной функции устройства, поскольку ферромагнитный сердечник отсутствует; малое значение постоянной времени пояса, что важно при использовании ИПТ в устройствах релейной защиты и автоматики; практически не ограниченный верхний предел измеряемых токов; независимость погрешностей от сопротивления нагрузки (при использовании в составе ИПТ усилителя).

Задачей данной работы, повторим, является анализ погрешностей только пояса Роговского. Что касается интегратора напряжения, то его можно выполнить на основе операционного усилителя [5]. К интегратору, кроме высоких метрологических характеристик, предъявляются следующие требования: большое входное сопротивление для обеспечения работы пояса Роговского в режиме холостого хода и возможность работы в режиме длительного интегрирования. Подчеркнем, что выражение (2) получено при условии работы пояса в режиме холостого хода, что обеспечить нетрудно включением между поясом и интегратором повторителя напряжения на основе операционного усилителя, имеющего входное сопротивление сотни мегаом. Анализ погрешностей интегрирующего устройства выходит за рамки данной статьи. Отметим также, что возможно использование и цифрового интегратора [8].

Для создания прецизионных устройств, важным является анализ погрешностей, вносимых поясом Рогов-

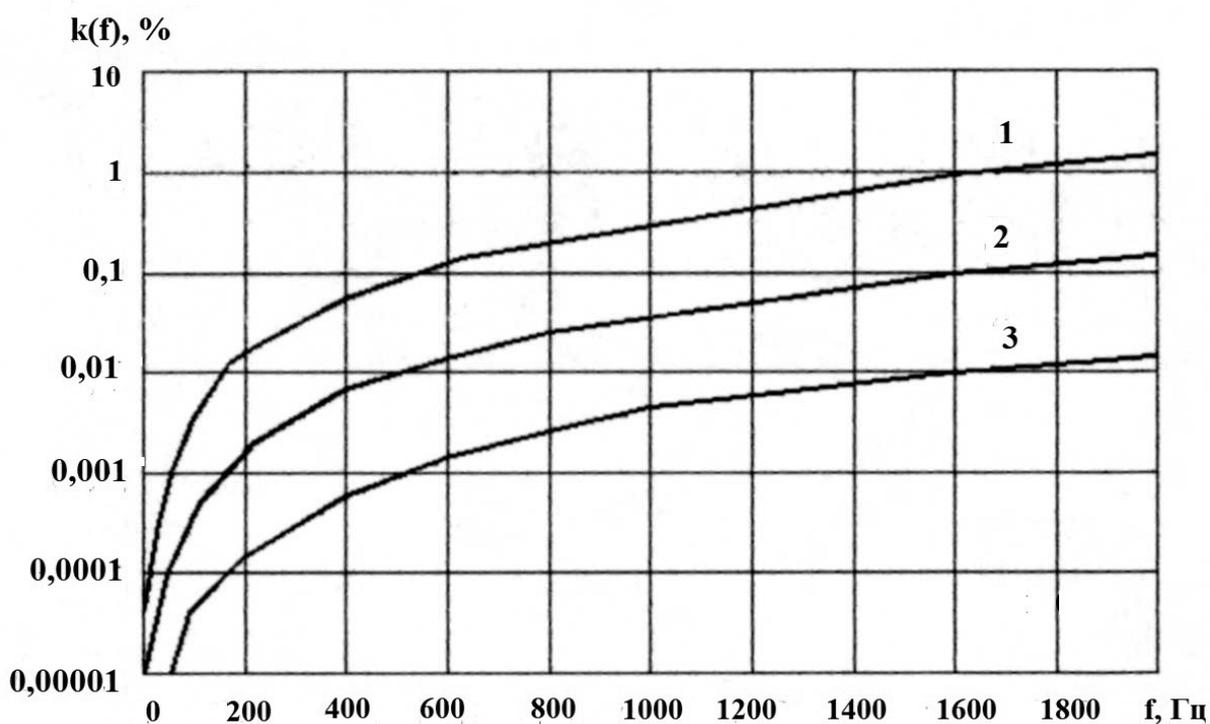


Рис. 2. Погрешности измерения из-за влияния паразитной емкости

ского вследствие его отличия от идеального контура (подробнее см. ниже).

В общем случае можно указать на следующие виды таких погрешностей:

1. погрешность из-за конечного числа витков катушки,
2. погрешность из-за влияния паразитной емкости,
3. погрешность от неравномерной намотки обмотки пояса,
4. погрешность от наклона витка обмотки.

Что касается погрешности 1) от использования конечного числа витков (элементарных преобразователей), то, как показывает анализ [6], она весьма мала (менее тысячных долей процента) при реальном (несколько тысяч) количестве витков.

Погрешность измерения тока от влияния паразитной емкости

Паразитная емкость (см. рис. 1) увеличивается, т.е. дает о себе знать, при неизбежном в установках высокого напряжения разнесении в пространстве катушки Роговского и остальных узлов ИПТ для обеспечения требований по электробезопасности. Как известно, паразитная емкость является распределенной (не имеющей конкретного места присоединения), поэтому на рис. 1 ее подключение показано с помощью пунктирной линии.

При отсутствии в схеме замещения ИПТ емкости $C_{нар}$ преобразователь имеет коэффициент передачи (или «идеальную» АЧХ), как следует из (1), равный

$$K = \frac{M}{R_0 C_0} \quad (3)$$

При учете же этой емкости выражение для АЧХ измерительного преобразователя изменится:

$$K(\omega) = \frac{M}{R_0 C_0} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 M C_{нар}} \quad (4)$$

Выражение (4) получено из простой схемы замещения, в которой появляется делитель тока, поскольку часть измеряемого тока протекает через паразитную емкость, чем и вызвано появление погрешности преобразования.

Паразитная емкость может достигать сотен пикофарад, взаимная индуктивность $M \ll 1$ Гн, поэтому произведение $M C_{нар} \approx (10^{-10} \dots 10^{-12}) \text{ с}^2$. Погрешность $k(f)$ от наличия $C_{нар}$ определялась по отличию АЧХ (4) от «идеальной» АЧХ (3) при $C_{нар} = 0$:

$$k(f) = \frac{K(\omega) - K}{K} = \frac{1}{1 - \omega^2 M C_{нар}} - 1.$$

На рис. 2 для примера приведены результаты расчетов этой погрешности преобразователя в процентах при изменении частоты входного сигнала, т.е. для различных гармоник промышленной частоты 50 Гц.

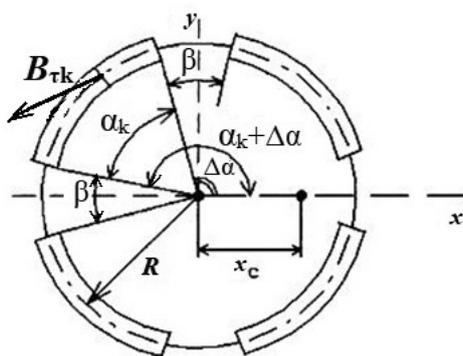


Рис. 3. Секторы с витками и безвитковые секторы пояса Роговского

Кривые 1,2,3 приведены при различных значениях произведения $MC_{нар} : (10^{-10} \dots 10^{-12}) \text{ с}^2$, соответственно. Погрешности на частоте основной гармоники входного сигнала весьма малы — менее тысячной доли процента.

Погрешности передачи высших гармоник тоже малы, например, даже для 20-й гармоники погрешность может составить всего порядка сотых долей процента.

Отметим, что по оси ординат масштаб — логарифмический (там не может быть нулевой точки), поэтому некоторые кривые на графике исходят не из нулевой точки оси абсцисс.

Погрешность измерения от неравномерности намотки обмотки пояса

Хотя саму обмотку пояса Роговского можно выполнить с достаточно высокой степенью равномерности, в реальных устройствах неизбежны безвитковые секторы обмотки в местах шарнирного соединения разъемных частей пояса, что необходимо, в частности, для обеспечения возможности монтажа и демонтажа устройства без разрыва цепи при его использовании в электроэнергетике.

В итоге возникает погрешность от неравномерности намотки, которая выражается в нежелательной зависимости выходного сигнала ИПТ: от смещения токопровода внутри пояса; от влияния внешних, по отношению к поясу, магнитных полей; от формы и размеров сечения токопровода с измеряемым током.

Дело в том, что принцип действия пояса Роговского основан на законе полного тока и все указанные погрешности связаны с переходом от идеального (как математической абстракции) контура, вдоль которого определяется циркуляция вектора напряженности магнитного поля в соответствии с законом полного

тока, к реальному контуру — в данном случае — поясу Роговского, т.е. все они относятся к инструментальным погрешностям.

Отметим, что теоретическое обоснование появления этих погрешностей для ряда других устройств, работающих на основе закона полного тока, сделано, например, в [9,10], а также — автором в [6,7].

Погрешность от неравномерности намотки рассмотрим на примере ее возникновения при смещении токопровода из центрального положения.

Пусть пояс со средним радиусом R (рис. 3) имеет секторы с обмоткой (их угловые координаты равны α_k и $\alpha_k + \Delta\alpha_k$) и безвитковые секторы β .

Обмотки в секторах α намотаны с равномерной угловой плотностью w_α . При расположении токопровода с измеряемым током I в центре пояса магнитная индукция в месте расположения витка равна:

$$B_{\tau k} = \frac{I}{2\pi R}. \quad (5)$$

Тогда, поскольку магнитный поток витка $\Phi_k = B_{\tau k} S_w$, где S_w — площадь витка, потокосцепление витков в секторе $d\alpha$ равно [7]:

$$d\Psi_0 = \frac{\mu_0 I w_\alpha S_w}{2\pi \cdot R} d\alpha, \quad (6)$$

а полное потокосцепление от всех секторов с обмотками

$$\Psi_0 = \int_0^{2\pi} d\Psi_0 = \frac{\mu_0 I w_\alpha S_w}{2\pi \cdot R} (360^\circ - n_\beta \beta), \quad (7)$$

где n_β — количество безвитковых секторов, оно равно количеству секторов с витками n .

Погрешность возникает при возможном смещении токопровода, например при монтаже устройства, на рас-

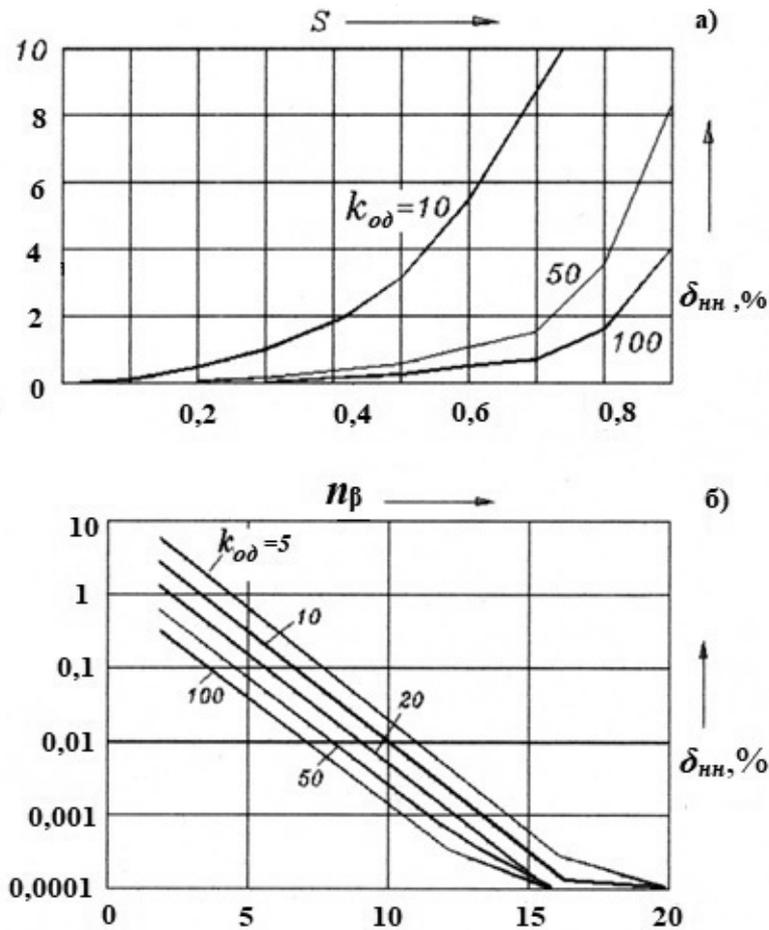


Рис. 4. Погрешность измерения из-за неравномерности катушки

стояние x_c по оси x (см. рис. 3). В этом случае индукция в плоскости витка изменяется по сравнению с (5):

$$B_{tk}^c = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot Z} \cos \alpha_k, \tag{8}$$

где $Z = \sqrt{R^2 + x_c^2 - 2Rx_c \cos \alpha_k}$. Выражая $\cos \alpha_k$ по теореме косинусов, можно получить формулу для потокосцепления витков в секторе $d\alpha$, при смещении токопровода, в виде:

$$d\Psi_c = \frac{\mu_0 I w_\alpha S_w}{2\pi \cdot R} \left(\frac{1 - S \cos \alpha}{1 + S^2 - 2S \cos \alpha} \right) d\alpha, \tag{9}$$

где $S = x_c/R$ - относительное смещение токопровода. Для получения полного потокосцепления интегрируем последнее выражение:

$$\Psi_c = \int_0^{2\pi} d\Psi = \frac{\mu_0 I w_\alpha S_w}{2\pi \cdot R} \int_0^{2\pi} \frac{1 - S \cos \alpha}{1 + S^2 - 2S \cos \alpha} d\alpha = \frac{\mu_0 I w_\alpha S_w}{2\pi \cdot R} \left[\int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{(1 + S^2) - 2S \cos \alpha} - \int_0^{2\pi} \frac{S \cos \alpha d\alpha}{(1 + S^2) - 2S \cos \alpha} \right] =$$

$$= \frac{\mu_0 I w_\alpha S_w}{2\pi \cdot R} \sum_{k=1}^n \left[\frac{\alpha}{2} + \arctg \left(\frac{1 + S}{1 - S} \tg \frac{\alpha}{2} \right) \right] \Bigg|_{\alpha_k}^{\alpha_k + \Delta \alpha}, \tag{10}$$

где n количество секторов с витками; α_k и $\alpha_k + \Delta \alpha$ — угловые координаты k -го сектора. Погрешность от неравномерности катушки можно определить как относительное изменение потокосцепления от (7) — токопровод в центре до (10) — токопровод смещен:

$$\delta_{nn} = \frac{\Psi_c - \Psi_0}{\Psi_0}. \tag{11}$$

Фрагменты расчетов иллюстрируются рис. 4. Анализ показал, что наличие даже небольших безвитковых секторов при их малом количестве вызывает заметные (до 10%) погрешности (δ_{nn}) в процентах при смещении токопровода: на рис. 4а приведены погрешности пояса круглой формы при количестве зазоров $n_\beta = n = 2$. На этом рисунке коэффициент k_{od} , который назовем коэффициентом однородности катушки, равен (см. рис. 3):

$$k_{od} = \frac{\Delta \alpha}{\beta}; \tag{12}$$

т.е. длина безвитковых секторов уменьшается при увеличении коэффициента $k_{од}$.

Из рис. 4а также видно, что погрешности снижаются при увеличении коэффициента однородности $k_{од}$ (чего следовало ожидать — это уменьшает длину безвитковых секторов), однако, при малом значении n погрешности даже при $k_{од}=50$ остаются заметными (например, около 1% при $S=0,6$).

Отсюда следует важный вывод: при разработке прецизионных устройств напрашивающийся путь снижения погрешностей, который заключается только в уменьшении длины безвитковых секторов, оказывается неэффективным. Для снижения погрешностей более действенным является метод, предполагающий увеличение количества безвитковых секторов, при этом они должны располагаться равномерно вдоль пояса. Для иллюстрации сказанного на рис. 4б приведены зависимости рассматриваемой погрешности $\delta_{ин}$ круглого пояса Роговского от изменения числа безвитковых секторов (напомним, что $n_{\beta} = n$ при различных значениях коэффициента однородности обмотки $k_{од}$) (12). Графики построены при относительном смещении $S = 0,5$.

Как видим, погрешности снижаются при увеличении числа безвитковых секторов n_{β} более быстрыми темпами, чем при увеличении коэффициента однородности $k_{од}$, и уже при $k_{од}=10$ погрешность от неравномерности обмотки составляет всего 0,01% при $n = 10$.

Отметим, что полученный результат — снижение погрешности при увеличении числа n_{β} на первый взгляд может выглядеть неожиданным, поскольку при этом увеличивается общая длина безвитковых секторов.

Практическая реализация предложенного метода может заключаться в следующем. Если, конструкция пояса предполагает наличие безвитковых секторов (зазоров), например, при шарнирном соединении частей пояса для измерения тока в электроэнергетике без разрыва цепи, то не нужно стремиться сделать эти зазоры минимально возможными (что на первый взгляд является логичным), а необходимо увеличить количество безвитковых секторов, расположив их равномерно по длине пояса.

Выводы

1. В работе проведено исследование возможности использования пояса Роговского (воздушного трансформатора) в электроэнергетике для измерения токов промышленной частоты, в частности, в установках высокого напряжения (десятки и сотни кВ).

2. Наличие паразитной емкости, которая увеличивается при неизбежном разнесении в пространстве высоковольтной (собственно — самого пояса) и низковольтной частей ИПТ не приводит к заметным погрешностям преобразования тока (погрешность ниже 0,01%).
3. Пояс Роговского работает на основе закона полного тока и ряд погрешностей измерения тока связан с переходом от идеального (абстрактного, математического) контура к реальному: погрешность от конечного числа элементарных измерительных элементов (витков); погрешность от неравномерности обмотки. Это приводит к нежелательной зависимости выходного сигнала ИПТ: от смещения токопровода внутри пояса; от влияния внешних, по отношению к поясу, магнитных полей; от формы и размеров сечения токопровода с измеряемым током.
4. Погрешность от использования конечного числа витков (элементарных преобразователей) весьма мала (менее тысячных долей процента) при реальном (несколько тысяч) количестве витков, что показал анализ, проведенный в [6].
5. Предложен эффективный метод снижения погрешности от неравномерности обмотки — увеличение количества безвитковых секторов (и соответственно секторов с витками) при их равномерном расположении вдоль контура. Указанная погрешность при этом может составлять всего 0,01% даже при значительном смещении токопровода (на половину радиуса пояса) относительно центрального положения. Также показано, что только уменьшение длины безвитковых секторов не является эффективным методом снижения погрешностей. Безвитковые секторы могут иметь место, например, при шарнирном соединении частей пояса для измерения тока в электроэнергетике без разрыва цепи.
6. Факт малых погрешностей при смещении токопровода также гарантирует то, что неравномерность обмотки не приведет к заметной зависимости результатов измерения тока от формы и размеров сечения токопровода. Этот вывод следует из того, что погрешности рассчитаны при протекании по линейному токопроводу, сечение которого стянуто в точку (нить тока), тогда реальный токопровод можно представить совокупностью нитей, смещенных относительно центра пояса. Отметим, что в электроэнергетике используются следующие формы токопроводов [11]: прямоугольные шины; корытный профиль; «двойное Т»; труба круглая; алюминиевая труба.
7. Учитывая полученные результаты, можно сделать вывод о возможности использования пояса Ро-

говского в электроэнергетике для измерения токов промышленной частоты в составе прецизионных ИПТ. Такой ИПТ имеет ряд преимуществ перед широко используемыми ТТ, в частности: линейность передаточной функции устройства,

малое значение постоянной времени пояса, что важно для повышения быстродействия ИПТ при его использовании в устройствах релейной защиты и автоматики; практически не ограниченный верхний предел измеряемых токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики: монография / Г. Е. Кувшинов, Д. Б. Соловьев; Российская таможенная академия, Владивостокский филиал. — Владивосток: РИО Владивостокского филиала Российской таможенной академии, 2012. 316 с.
2. Алексеев Б. А. Новые решения в технике измерения тока и напряжения на СВН // Энергохозяйство за рубежом, 1992, № 5.
3. Optical current transducers for power systems: A review // IEEE Trans Power. Deliv, 1994, № 4.
4. Шваб А. Измерение на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения.: Пер. с нем. — М.: Энергия, 1973.
5. Казаков М. К., Крамаренко С. В., Казаков Н. М. Интегрирующий измерительный преобразователь // Патент на полезную модель России № 46373, 2005. Бюлл. № 18.
6. Казаков М. К. Использование закона полного тока в дискретной форме для измерения больших постоянных токов. — Электричество, 1997, № 9.
7. Казаков М. К. Измерение больших постоянных токов без разрыва электрической цепи. — Ульяновск: Издательство УлГТУ, 1997.
8. Реализация цифрового интегратора с применением дельтапреобразования. [Электронный ресурс]. Доступ: <https://science-education.ru/pdf/2013/1/62.pdf>.
9. Семенко Н. Г., Гамазов Ю. А. Методы и средства измерений больших постоянных токов и их метрологическое обеспечение // НТО "Прим- прибор". -М.: Изд-во стандартов, 1982.
10. Спектор С. А. Измерение больших постоянных токов. — Л.: Энергия, 1978.
11. Семчинов А. М. Токопроводы промышленных предприятий. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 208с.

© Казаков Михаил Константинович (vokazak.m@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Гжельский государственный университет