

УДК 621.321

Исследование погрешностей измерения тока поясом Роговского на основе математического и физического моделирования

В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков, А.Е. Нестерихин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: VD_Lebedev@mail.ru, AndrewYablokov@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время токи в ЛЭП и на подстанциях измеряют с помощью аналоговых измерительных трансформаторов тока. Анализ трансформаторов тока показывает, что более 50 % из них не обеспечивают свой метрологический класс точности из-за перегрузки по вторичным цепям, имеют искажения формы сигналов в переходных режимах, особенно во время коротких замыканий, передают недостоверную информацию о токах короткого замыкания из-за насыщения сердечников, приводя к задержкам и неселективной работе релейной защиты. Кроме того, традиционные трансформаторы тока не исключают коммерческих потерь и возможности хищения электроэнергии из-за низкого класса точности. В связи с этим актуальны разработка и исследование датчиков тока, лишенных перечисленных недостатков.

Материалы и методы: Исследование пояса Роговского проводилось на математических и физических моделях. Математические модели разработаны в программном пакете COMSOL Multiphysics. Физические модели пояса Роговского имеют разомкнутую конструкцию.

Результаты: По результатам исследования электромагнитного поля пояса Роговского разомкнутой конструкции определены и обоснованы его фазовые погрешности при измерении тока в токопроводе прямоугольной формы. Исследованы способы уменьшения этих погрешностей. Обосновано отсутствие фазовых погрешностей пояса Роговского при использовании токопроводов круглой формы. Приведены амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики пояса Роговского, полученные экспериментально на физической модели.

Выводы: Для уменьшения погрешностей пояса Роговского разомкнутой конструкции при измерении тока в токопроводе прямоугольной формы эффективно использовать небольшой ферромагнитный стержень, расположенный в месте соединения половинок пояса. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики экспериментальных образцов показали полное их соответствие теории.

Ключевые слова: цифровой трансформатор тока, пояс Роговского, прямоугольный токопровод, цилиндрический токопровод, полевая модель, COMSOL Multiphysics.

Error investigation of current measurement by the Rogowski coil based on mathematical and physical modelling

V.D. Lebedev, A.A. Yablokov, A.E. Nesterikhin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: VD_Lebedev@mail.ru, AndrewYablokov@yandex.ru

Abstract

Background: Nowadays, currents in power lines and substations are measured by analog measuring current transformers. Analysis of current transformers shows that more than 50 % of them do not provide the metrological accuracy required for their class due to congestion in the secondary circuits, have signal shape distortions in transient regimes, especially under short circuits, convey incorrect information about short-circuit currents due to core saturation which results in delays and non-selective operation of relay protection. In addition, the inaccuracy of traditional current transformers cannot eliminate probable commercial losses and electricity thefts. Therefore, it is urgent to develop and study current sensors that do not have the above-mentioned defects.

Materials and methods: The study of the Rogowski coil was conducted on mathematical and physical models. The mathematical models were developed in the software package COMSOL Multiphysics. The physical models of the Rogowski coil have an open-loop structure.

Results: The study of the open-loop Rogowski coil electromagnetic field made it possible to determine and substantiate the field phase errors while measuring the current in rectangular conductors. Techniques of reducing these errors were investigated. It was proved that the Rogowski coil has no phase errors in cylindrical conductors. The paper represents the Rogowski coil amplitude-frequency and phase-frequency response characteristics obtained experimentally on the basis of the physical model.

Conclusions: The open-loop Rogowski coil errors, occurring at the time of measuring the current in rectangular conductors, are efficiently reduced by placing a small ferromagnetic bar at the coil halves joint. The amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the experimental samples proved to be in complete agreement with the theory.

Key words: digital current transformers, Rogowski coil, rectangular conductor, cylindrical conductor, field model, COMSOL Multiphysics.

Введение. В настоящее время в электроэнергетике выбрано направление создания интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью. Ключевым компонентом данной сети являются «цифровые» подстанции. Такие подстанции строятся на основе интегрированных цифровых систем измерения, защиты и управления с применением цифровых трансформаторов тока и напряжения и цифровых схем управления. Таким образом, актуальной становится задача разработки цифровых систем измерения.

Измерительные преобразователи тока для цифровых трансформаторов могут быть выполнены на основе не получивших до настоящего времени широкого применения датчиков тока и их сочетаний. В разрабатываемом цифровом трансформаторе тока использовано несколько первичных преобразователей, в том числе пояс Роговского, электромагнитный трансформатор тока, а также магнитотранзисторный преобразователь [1, 2].

Пояс Роговского получает все большее применение в качестве первичных преобразователей для релейной защиты (см., например, [3–5]). Практический интерес для реализации измерительных преобразователей представляют пояса Роговского разомкнутой конструкции, при этом возникает вопрос о точности измерительного преобразователя.

Разъемная конструкция, наряду с удобством установки, имеет недостатки, связанные с погрешностями, обусловленными отсутствием обмотки в местах разъема.

Для исследования погрешностей реализованы математические модели. Разработанные модели основаны на решении уравнения относительно векторного магнитного потенциала:

$$j\omega\sigma\vec{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times \vec{A}) = (\sigma\Delta V/L)\vec{e}_z, \quad (1)$$

где j – мнимая единица; ω – циклическая частота; σ – электропроводность; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость; ΔV – напряжение, приложенное к моделируемой длине первичного провода L (при такой постановке возможно учесть распределение плотности тока внутри токопровода и, соответственно, распределение магнитного поля; \vec{e} – единичный вектор, вдоль которого направлен первичный ток.

Решение уравнения осуществляется с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Аналогичные расчеты по исследованию трансформаторов напряжения более подробно представлены в [8]. Выбраны необходимые граничные условия, исследована и выбрана сетка конечных элементов.

На рис. 1 приведены картины электромагнитного поля для пояса Роговского с различными видами токопроводов.

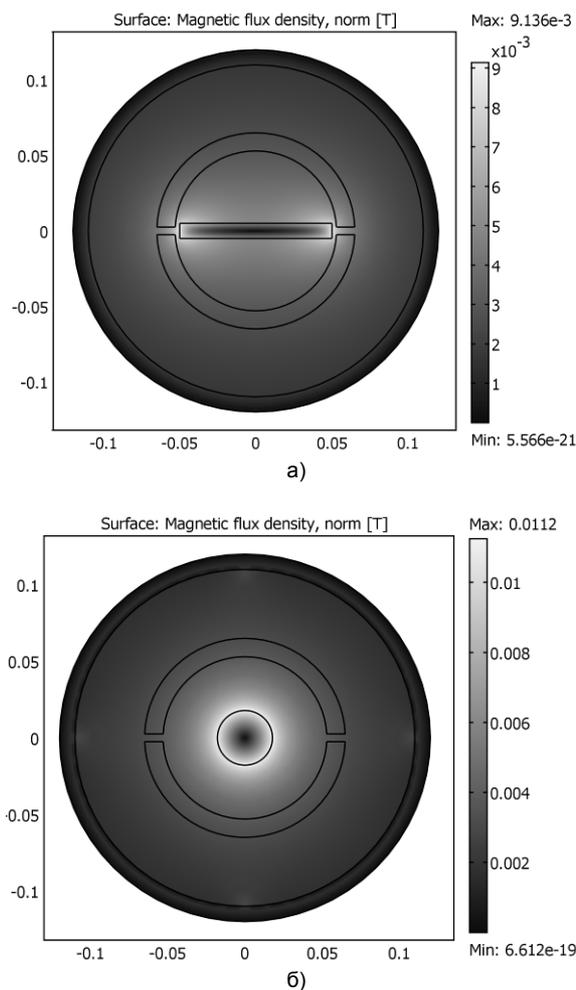


Рис. 1. Электромагнитные поля для пояса Роговского: а – с прямоугольным токопроводом; б – с цилиндрическим

Выходным сигналом пояса Роговского является напряжение, обусловленное ЭДС электромагнитной индукции, которая определяется по напряженности электрического поля (вихревой компоненте). Такое определение основано на допущении отсутствия тока в измерительной обмотке пояса. Для синусоидального тока наведенное напряжение на обмотке пояса определяется следующим образом:

$$U = \int_l \vec{E} d\vec{l}, \quad (2)$$

где \vec{E} – вектор напряженности вихревой компоненты электрического поля; $d\vec{l}$ – элемент длины, являющийся векторной величиной по направлению, соответствующему направлению проводников в обмотке пояса; кривая l – проходит по осевой линии провода обмотки пояса Роговского и равна полной длине этого провода.

Вследствие малости сечения провода, а также симметричности его расположения для прямоугольной катушки, было принято определение ЭДС через усреднение вектора напряженности по сечению обмотки:

$$E_{\vec{n}0} = \oint_S E ds, \quad (3)$$

где S – поперечное сечение обмотки.

При прохождении переменного тока ($f = 50$ Гц) по проводнику большого сечения наблюдается явление поверхностного эффекта, которое тем выражено сильнее, чем выше частота переменного тока.

Для первичного провода с круглым сечением распределение плотности синусоидального тока по сечению определяется аналитическим выражением [6]:

$$\dot{\delta}_m = \frac{i_m \sqrt{-j\omega\mu\sigma} J_0(r\sqrt{-j\omega\mu\sigma})}{2\pi R J_1(R\sqrt{-j\omega\mu\sigma})}, \quad (4)$$

где i_m – амплитуда тока; ω – циклическая частота тока; μ , σ – магнитная проницаемость и электропроводность проводника с током соответственно; R – радиус проводника; J_0 , J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; r – координата, в которой определяется плотность тока.

Согласно (4), плотность тока в сечении провода распределяется неравномерно не только по своему амплитудному значению, но и по фазе. Так, ближе к центру плотность тока отстает (носит индуктивный характер), ближе к поверхности – опережает (носит емкостный характер).

Магнитное поле вокруг проводника с идеально круглым сечением распределяется независимо от создающего его распределения плотности тока по сечению проводника, что является следствием решения первого уравнения Максвелла:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = i.$$

Для проводников с прямоугольным сечением (например, получившие широкое распространение шины с соотношением сторон 1/10) магнитное поле уже будет иметь как действительные, так и мнимые компоненты, соотношение которых изменяется в зависимости от частоты тока.

Реальные измерительные преобразователи тока, такие как пояс Роговского, могут иметь конструктивные особенности, заключающиеся в отсутствии части витков, например, в разъемной части пояса. В этом случае интегрирование будет выполняться неточно, а погрешность измерения будет иметь не только амплитудную, но и угловую составляющие.

Результаты расчетов, выполненных с использованием программы COMSOL Multiphysics при задании полного тока в токопроводе с нулевой фазой, показали распределение плотности тока по сечению токопровода, причем, как и следовало ожидать, плотность тока не просто увеличилась на поверхности, но и произошло

разложение плотности тока на действительную и мнимую компоненты (рис. 2–6).

Сравнение результатов расчета, выполненного для провода круглого сечения численным методом в программе COMSOL Multiphysics по уравнению (1) и по формуле (4), позволило подобрать размеры конечных элементов и параметры решателя для получения высокой точности моделирования. Расчетные графики покомпонентного распределения вектора плотности тока, его модуля и фазы вдоль радиуса, представленные на рис. 2, показывают полное совпадение аналитических и численных результатов.

На рис. 7, 8 показано распределение действительной и мнимой компонент векторного магнитного потенциала при использовании прямоугольного токопровода. Наличие мнимой компоненты векторного магнитного потенциала вне прямоугольного токопровода приводит к наличию фазовой погрешности пояса Роговского. Для ее уменьшения в [7] предложено использовать ферромагнитную муфту.

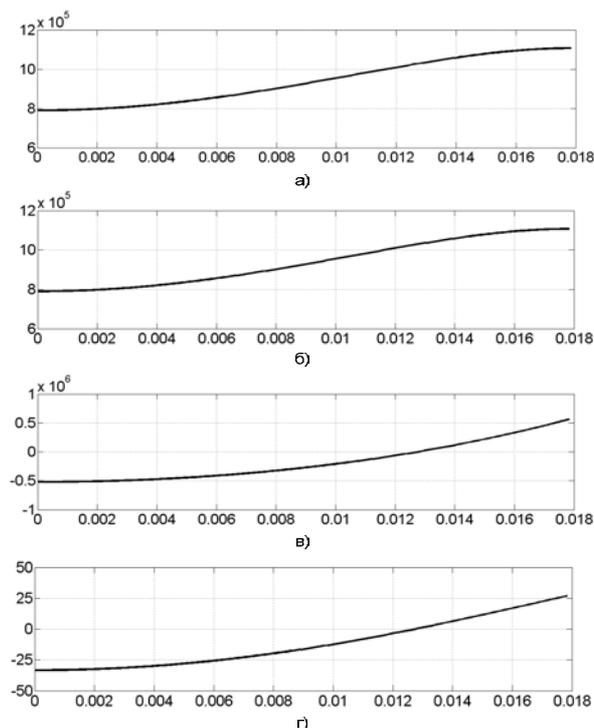


Рис. 2. Распределение плотности тока вдоль радиуса цилиндрического токопровода: а – модуль; б – действительная компонента; в – мнимая компонента; г – угол между действительной и мнимой компонентами

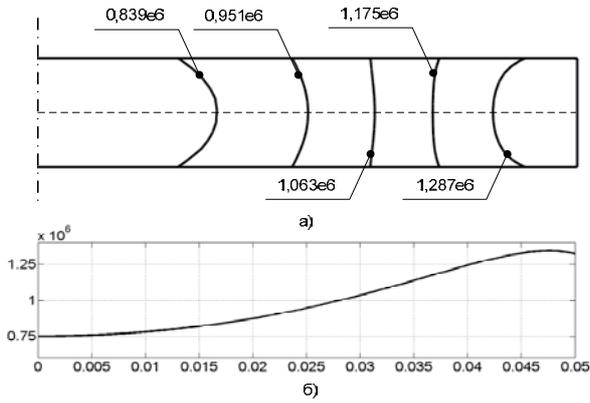


Рис. 3. Распределение модуля плотности тока по сечению прямоугольного токопровода: а – полевая картина; б – распределение вдоль штриховой линии

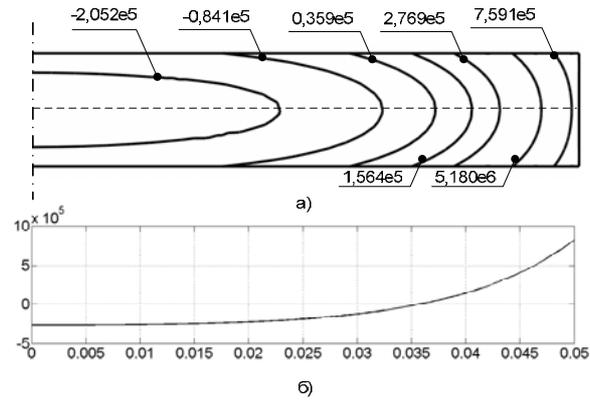


Рис. 4. Распределение мнимой компоненты плотности тока по сечению прямоугольного токопровода: а – полевая картина; б – распределение вдоль штриховой линии

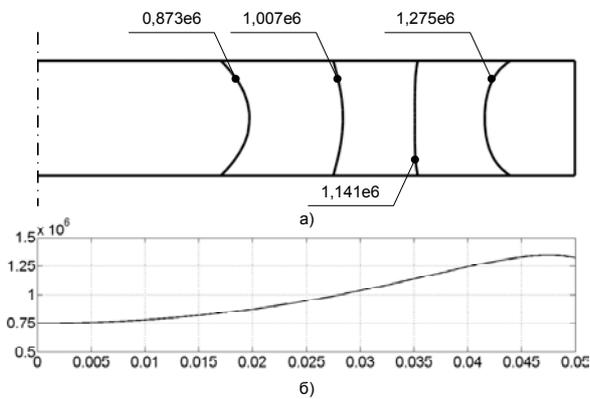


Рис. 5. Распределение действительной компоненты плотности тока по сечению прямоугольного токопровода: а – полевая картина; б – распределение вдоль штриховой линии

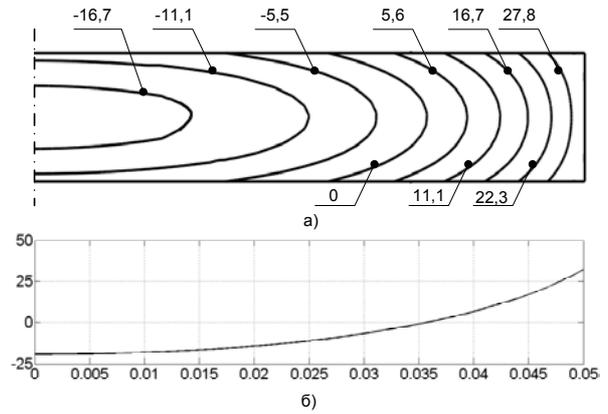


Рис. 6. Фаза плотности тока по сечению прямоугольного токопровода: а – полевая картина; б – распределение вдоль штриховой линии

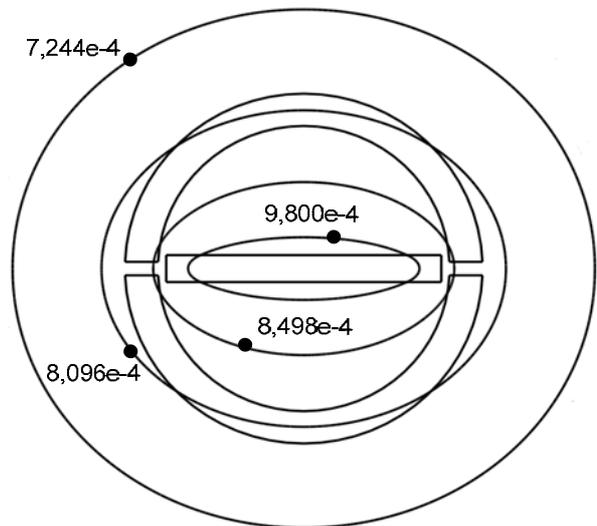


Рис. 7. Распределение действительной компоненты векторного магнитного потенциала при прямоугольном токопроводе

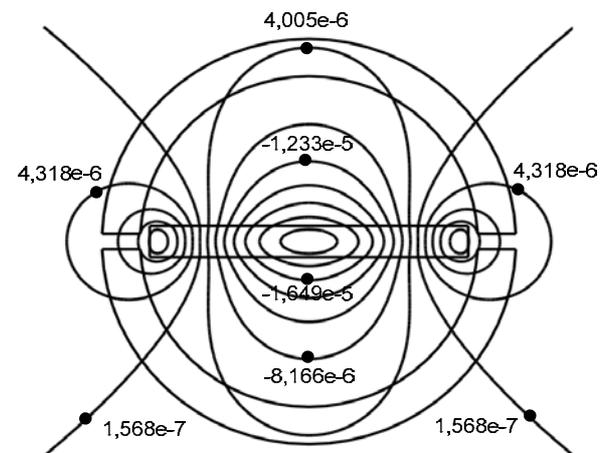


Рис. 8. Распределение мнимой компоненты векторного магнитного потенциала при прямоугольном токопроводе

На разработанных математических моделях было определено влияние на погрешность измерений следующих факторов:

- отсутствия обмотки в месте соединения двух половин пояса Роговского;
- наличия ферромагнитного стержня в месте соединения половинок пояса Роговского;
- наличия муфты, выполненной из ферромагнитного материала, в месте соединения;
- формы токопровода;
- места расположения токопровода внутри пояса.

По результатам исследования электромагнитного поля пояса Роговского были сделаны следующие выводы:

1. Если токопровод имеет прямоугольную форму, то отсутствие обмотки в месте соединения половинок пояса Роговского приводит к наличию фазовых погрешностей (до $0,4^\circ$), зависящих от расположения токопровода. Наименьшее значение погрешности достигается при повороте токопровода на угол 45° относительно места соединения половинок пояса Роговского.

2. Размещение ферромагнитного стержня в месте соединения половинок пояса Роговского позволяет уменьшить фазовую погрешность. Ферромагнитный стержень более эффективен, чем ферромагнитная муфта.

3. Уменьшение размеров муфты приводит к увеличению фазовой погрешности.

4. Отсутствие обмотки в месте соединения половинок пояса Роговского при токопроводе цилиндрической формы (площадь поперечного сечения равна площади поперечного сечения токопровода прямоугольной формы) практически не оказывает влияния на фазовую погрешность.

5. Смещение токопровода цилиндрической формы к месту соединения половинок пояса Роговского практически не оказывает влияния на фазовую погрешность, однако наличие ферромагнитного стержня или муфты приводит к появлению фазовой погрешности.

Результаты расчетов были проверены экспериментально. При выполнении исследования было получено полное соответствие амплитудно-частотных (рис. 9) и фазочастотных (рис. 10) характеристик экспериментальных образцов теоретическим расчетам.

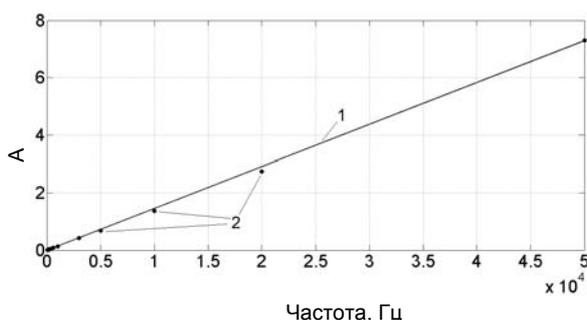


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика: 1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальные значения

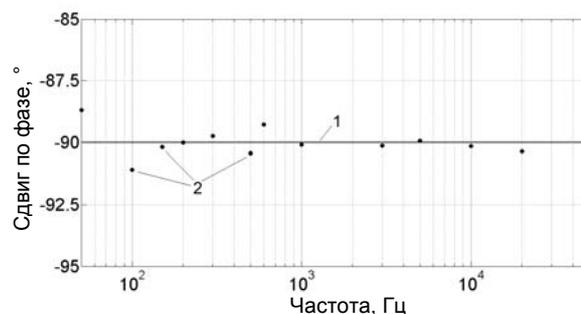


Рис. 10. Фазочастотная характеристика в логарифмическом масштабе: 1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальные значения

Исследования выполнены в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» по теме «Разработка теоретических основ создания высоковольтных (110–220 кВ) цифровых измерительных преобразователей тока с оптоэлектронным интерфейсом на базе фундаментальных физических законов с использованием современных материалов и микроэлектроники» (Государственный контракт №14.516.12.0005).

Список литературы

1. Лебедев В.Д. Разработка магнитотранзисторных датчиков тока для систем защиты и измерений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1997. – 19 с.
2. Лебедев В.Д., Филатова Г.А., Нестерихин А.Е. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013.
3. Rezaee M., Heydari H. Design Modification of Rogowski Coil for Current Measurement in Low Frequency // International Journal of electrical engineering & technology (IJEET). – 2010. – V. 6, № 4 – P. 232–237.
4. Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying / Ljubomir Kojovic, Robert Beresh, Martin Bishop, Radek Javora, Bruce Magruder, Peter McLaren, Brian Mughalian, Arnold Offner // IEEE PSRC Special Report. – 2010. – 72 p.
5. Pilot application with non conventional instrument transformers and digital protections using IEC protocol for communication / D. Chatrefou, P. Ponchon, D. Duplan, M. Osbourne // Conference CIGRE. – 2006. – 22 p.
6. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: учеб. для вузов / Г.И. Атабеков, С.Д. Купалян, А.Б. Тимофеев, С.С. Хухриков. – М.: Лань, 2013. – 432 с.
7. Тюрпен П. Новый класс датчиков переменного тока на основе катушек Роговского // Электронные компоненты. – 2010. – Вып. 12. – С. 37–39.
8. Лебедев В.Д., Яблоков А.А. Исследование антирезонансного трансформатора напряжения 220 кВ на основе математического моделирования. Сравнительный анализ конструкций // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 25–28.

References

1. Lebedev, V.D. *Razrabotka magnitotranzistornykh datchikov toka dlya sistem zashchity i izmereniy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of magnetotransistor current sensors for measurement and protection systems. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 1997. 19 p.
2. Lebedev, V.D., Filatova, G.A., Nesterikhin, A.E. *Izmeritel'nye preobrazovateli toka dlya tsifrovyykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki* [Current transducers for digital devices of relay protection and automation]. *Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Abstracts of the IVth international scientific and technical conference]. Yekaterinburg, 2013.

3. Rezaee, M., Heydari, H. Design Modification of Rogowski Coil for Current Measurement in Low Frequency. International Journal of electrical engineering & technology (IJEET), 2010, vol. 6, no. 4, pp. 232–237.

4. Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying / Ljubomir Kojovic, Robert Beresh, Martin Bishop, Radek Javora, Bruce Magruder, Peter McLaren, Brian Mu-galian, Arnold Offner. IEEE PSRC Speial Report, 2010. 72 p.

5. Chatrefou, D., Ponchon, P., Duplan, D., Osbourne, M. Pilot application with non conventional instrument transformers and digital protections using IEC protocol for communication. Conference CIGRE, 2006. 22 p.

6. Atabekov, G.I., Kupalyan, S.D., Timofeev, A.B., Khukhrikov, S.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Nelineynye*

elektricheskie tsepi. Elektromagnitnoe pole [Theory of Electrical Engineering. Non-linear electric circuits. Electromagnetic field]. Moscow, Lan', 2013. 432 p.

7. Tyurpen, P. Novyy klass datchikov peremennogo toka na osnove katushek Rogovskogo [A new class of Rogowski-coil-based AC sensors]. *Elektronnye komponenty*, 2010, issue 12, pp. 37–39.

8. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A. Issledovanie antirezonnansnogo transformatora napryazheniya 220 kV na osnove matematicheskogo modelirovaniya. Sravnitel'nyy analiz konstruktivnykh [Investigation of antiresonant 220 kV voltage transformers on the basis of mathematical modeling. Comparative analysis of structures]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 25–28.

Лебедев Владимир Дмитриевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами,

телефон (4932) 26-99-04,

e-mail: VD_Lebedev@mail.ru

Яблоков Андрей Анатольевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

аспирант кафедры систем управления,

e-mail: AndrewYablokov@yandex.ru

Нестерихин Александр Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

магистр кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,

телефон (4932) 26-99-04.