

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>

Особенности применения датчиков тока и напряжения при расчёте несимметрии электрической сети

Р. Ю. Закурдаев¹, И. Е. Чернецкая¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: white731@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является рассмотрение основных особенностей применения датчиков тока и напряжения при определении коэффициента несимметрии электрической сети. Важным вопросом также является значение погрешностей средств измерения, при котором влияние на определение коэффициента несимметрии не оказывается.

Методы. В статье рассмотрены классификации основных датчиков тока и напряжения. Показан пример реализации одного из вариантов датчика напряжения и аналого-цифрового преобразователя. Пояснена суть процесса симметрирования, рассмотрены различные коэффициенты несимметрии, приведены поясняющие формулы. Упомянуты главные требования к схемам измерения токов и напряжений и к вычислительной обработке сигналов. В частности, рассмотрены такие важные моменты, как определение угла сдвига фаз, определение параметров сети и учёт влияния погрешностей измерения на определение коэффициента несимметрии. Рассмотрен вопрос определения угла сдвига фаз и указана необходимость его определения. Пояснено, что при определении параметров сети необходимо соблюдать высокую точность измерений.

Результаты. Рассмотрено влияние инструментальной погрешности измерений на определение коэффициента несимметрии и определён класс точности приборов, ниже которого при определении коэффициента несимметрии может возникнуть ошибка. При определении класса точности приборов, для которых возникает недопустимая ошибка, упоминается вероятностная модель распределения мощностей трёхфазной электрической сети, приводится графическое описание этой модели. Показано определение наборов коэффициентов несимметрии до симметрирования, после симметрирования и после симметрирования с учётом ошибки. Упомянуто, что при определении данных наборов применяются веса в качестве повышающих и понижающих коэффициентов для слагаемых, входящих в набор. Вводится коэффициент, показывающий, насколько процентов изменится снижение несимметрии из-за влияния ошибки. Рассматривается зависимость этого коэффициента от величины погрешности измерения.

Заключение. Делается вывод о величине погрешности, при котором влияние на определение коэффициента несимметрии не оказывается.

Ключевые слова: датчики тока; датчики напряжения; несимметрия; электрическая сеть; симметрирование.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Закурдаев Р. Ю., Чернецкая И. Е. Особенности применения датчиков тока и напряжения при расчёте несимметрии электрической сети // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 160-169. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>.

Статья поступила в редакцию 12.03.2019

Статья подписана в печать 04.04.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>

Specific Features of Application of Current and Voltage Transducers When Calculating Electrical Network Unbalance

Roman Yu. Zakurdaev ¹, Irina E. Chernetskaya ¹ ✉

¹ Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: white731@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this article is to consider the main features of the application of current and voltage transducers determining the electrical network unbalance factor. Also, an important issue is the value of measuring instruments inaccuracy, at which there is no impact on the unbalance factor determining.

Methods. The article describes classifications of main current and voltage transducers. An example of the implementation of one of the voltage transducer and analog-to-digital converter variants is shown. The essence of the process of balancing is explained, various unbalance factors are considered, explanatory formulae are provided. The main requirements for current and voltage measurement circuits and for computational signal processing are mentioned. In particular, such important points as determining the phase angle, determining the network parameters and consideration of the influence of measurement errors on the determination of the unbalance factor are studied. The issue of determining the phase angle is considered and the need for its determination is indicated. It is explained that when determining the network parameters, high precision of measurement is required.

Results. The impact of the instrumental error of measurements on the determination of the unbalance factor is considered, and instruments rating below which an error may occur while finding the unbalance factor is determined. When determining the instrument rating at which an unacceptable error occurs, a probabilistic model of power distribution of a three-phase network is mentioned; a graphical description of this model is given. Determining the sets of unbalance factors before balancing, after balancing and after balancing taking into account the error, is provided. It is mentioned that in determining these sets, weights are used as increasing and decreasing factors for the terms included in the set. The factor showing the percentage of the decrease of unbalance changes due to the effect of the error is introduced. The dependence of this factor on the measurement error is considered.

Conclusion. A conclusion on the value of the error which does not impact the determination of the unbalance factor is provided.

Keywords: current transducers; voltage transducers; unbalance; electrical network; balancing.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zakurdaev R. Yu., Chernetskaya I. E. Specific Features of Application of Current and Voltage Transducers When Calculating Electrical Network Unbalance. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 160-169 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>.

Received 12.03.2019

Accepted 04.04.2019

Введение

Определение несимметрии токов и напряжений электрической сети имеет важное практическое значение. Коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательностям используются в ГОСТе¹ и являются одним из параметров качества электроэнергии. При расчёте потерь электроэнергии используется коэффициент неравномерности токов. В устройствах снижения несимметрии также предварительно требуется оценить уровень несимметрии.

Целью данной статьи является рассмотрение основных особенностей применения датчиков тока и напряжения при определении коэффициента несимметрии электрической сети, а также определение значения погрешностей средств измерения, при котором не будет оказано влияние на определение коэффициента несимметрии.

Современные вычислительные устройства обрабатывают данные в цифровом виде [1]. Для определения и представления параметров сети в цифровом виде используются блоки вычислительной техники, состоящие из:

- датчика тока;
- датчика напряжения;
- преобразователя тока в напряжения;

– аналого-цифрового преобразователя напряжения.

Технические решения для измерения тока можно классифицировать на несколько видов [2]:

- токовый шунт;
- трансформатор тока;
- катушка Роговского;
- датчики на основе эффекта Холла разомкнутого и замкнутого контуров;
- сигма-дельта модулятор.

Датчики для измерения напряжения также можно классифицировать [3]:

- резисторный делитель и аналоговый усилитель без гальванической развязки;
- делитель и аналоговый усилитель с гальванической оптронной развязкой.

На рис. 1 показаны два датчика переменного напряжения и плата Arduino Uno на базе микроконтроллера Atmega328P. Датчик переменного напряжения, смонтированный на макетной плате, состоит из выпрямительного диодного моста и резисторного делителя.

Под уровнем несимметрии понимается любой из используемых на практике относительных показателей, характеризующих несимметрию [4], например:

- коэффициенты несимметрии напряжений обратной (1) и нулевой (2) последовательностей, определяемые как отношение действующих значений напряжений этих симметричных составляющих к напряжению прямой последовательности [5]

¹ ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115349>.

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_1}, \quad (1)$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности; U_1 – напряжение прямой последовательности;

$$k_{0U} = \frac{U_0}{U_1}, \quad (2)$$

где U_0 – напряжение нулевой последовательности; суммарное относительное отклонение по мощности, определяемое как отношение суммы модулей разности фазного и среднего значения мощности к среднему значению мощности [6];

$$k = \frac{|S_A - S_{cp}| + |S_B - S_{cp}| + |S_C - S_{cp}|}{S_{cp}}, \quad (3)$$

где S_A – мощность фазы А; S_B – мощность фазы В; S_C – мощность фазы С; S_{cp} – средняя мощность трёх фаз:

$$S_{cp} = \frac{S_A + S_B + S_C}{3}; \quad (4)$$

– коэффициент неравномерности токов, определяемый как отношение суммы квадратов фазных токов к квадрату суммы фазных токов и т.п. [7].

$$k_{\text{неравн}} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2}, \quad (5)$$

где I_A , I_B , I_C – токи фаз А, В и С соответственно.

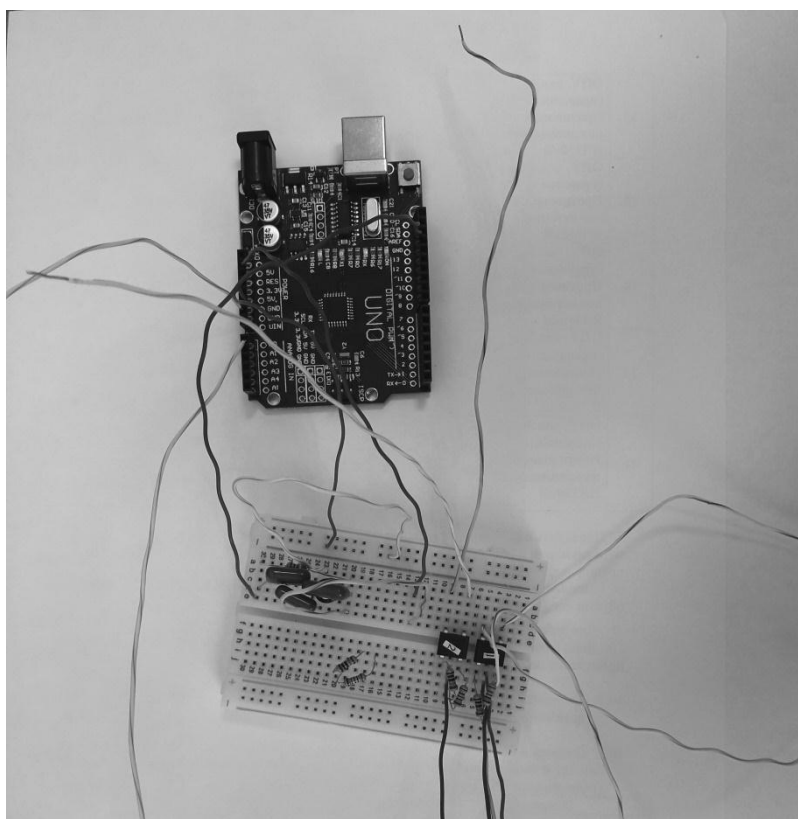


Рис.1. Плата Arduino Uno и датчики напряжения

Fig.1. Arduino Uno board and voltage sensors

Материалы и методы решения задачи

Для большинства коэффициентов несимметрии требуется, помимо значений токов и напряжений, определять ещё и угол сдвига фаз между током и напряжением. Реализация такого условия требует совместного использования датчика тока и напряжения для одной фазы. В трёхфазной сети применяется три датчика тока и три датчика напряжения [8].

Аналоговый сигнал с каждого из шести датчиков (рис. 2) преобразовывается в цифровой сигнал для дальнейшей обработки. Обработка мгновенных значений токов и напряжений заключается в определении действующих значений за период методом преобразования Фурье и нахождение угла сдвига фаз φ [10].

При симметрировании сети включением дополнительной мощности или

перераспределением существующей необходимо рассчитать режим изменённой сети. Для этого требуется знать электрическое сопротивление нагрузок и сопротивления проводов сети, которые составляют от сотых долей Ом для проводов линии до десятков и сотен Ом для нагрузок. Сопротивление определяется расчётным способом, имея в качестве входных величин токи и напряжения [10]. При этом падение напряжения на проводах линии составляет десятые доли вольт, в то время как измеряются фазные напряжения, равные 220 В. По этой причине важно выполнить измерение фазных величин с высокой точностью, чтобы затем при расчётах получить величины на два-три порядка меньше с достаточной точностью. Расчёты производятся микроконтроллером на базе Atmega328P (см. рис. 2) [11].

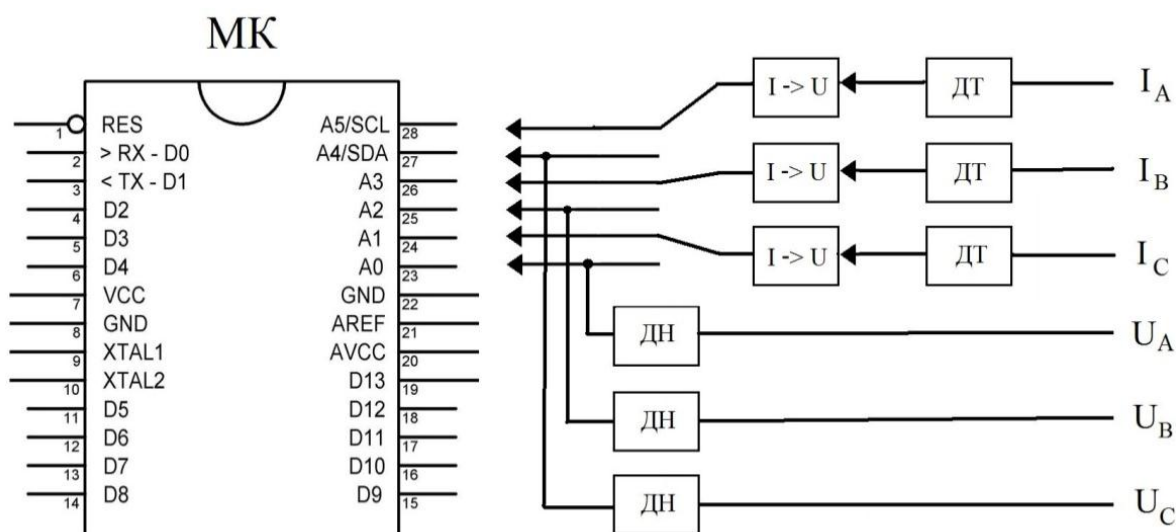


Рис.2. Измерения для аналого-цифрового преобразования на базе микроконтроллера Atmega328P

Fig.2. Measurements for analog-to-digital conversion based on Atmega328P microcontroller

Зависимость вероятности снижения несимметрии от величины такого снижения представлено на рисунке 3 по результатам исследования [3]. На графике изображен 21 отрезок, так как количество неповторяющихся вариантов снижений несимметрии $m_2=21$. Все остальные варианты на графике накладываются друг на друга, так как имеют идентичное снижение несимметрии.

Таким образом, каждой вероятности появления одного из вариантов ставится в соответствие достижимое снижение несимметрии. Полученная зависимость показывает, какова вероятность того, что в произвольной электрической сети с известным количеством присоединений n , суммарной мощностью

ΣP , будет возможным произвести снижение несимметрии на определённую величину.

Наибольшая вероятность снижения несимметрии – больше 0,002% для каждого варианта – наблюдается у 44016 вариантов, и при этом снижение несимметрии составит от 50% до 75% (см. рис. 3). Суммарная вероятность снижения несимметрии всех 44016-ти вариантов составит 62,78%.

Для рассмотрения вопроса ошибки при определении мощностей (напряжений и токов) следует проанализировать следующую зависимость. Аргументом является погрешность из ряда стандартных классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0.

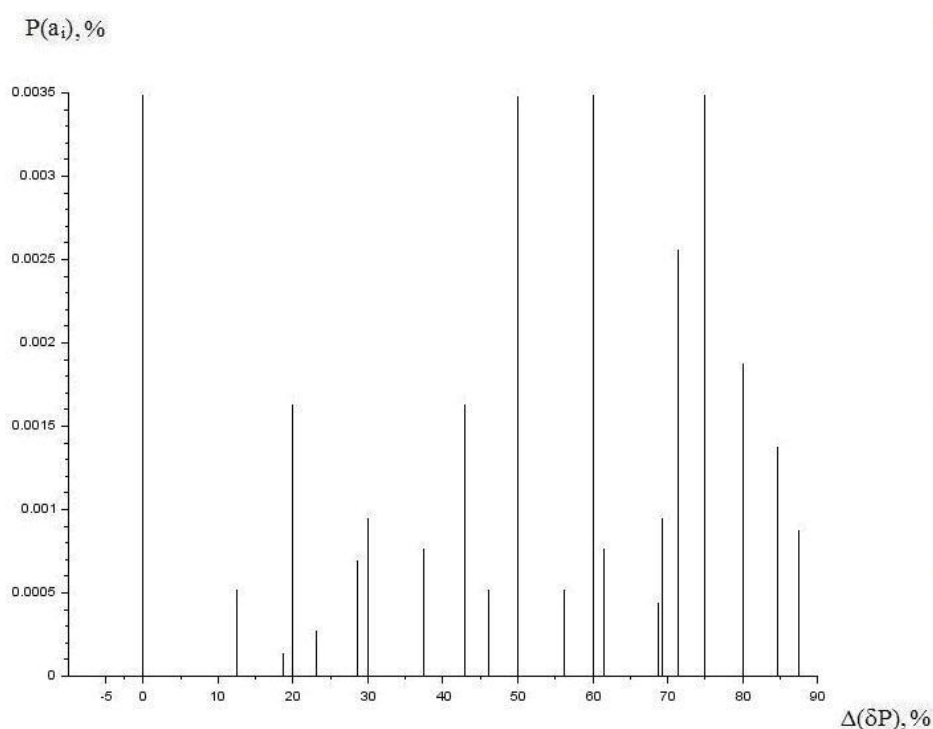


Рис.3. Зависимость вероятности снижения несимметрии от величины снижения в предлагаемом способе

Fig.3. The dependence of the probability of reducing asymmetry on the magnitude of the reduction in the proposed method

Для набора коэффициентов несимметрии до симметрирования $k_{\text{несим_до}}$ рассчитывается суммарный коэффициент с учётом их весов:

$$k_{\text{сумм_несим_до}} = k_{\text{несим_до_1}} \cdot W_1 + k_{\text{несим_до_2}} \cdot W_2 + \dots + k_{\text{несим_до_75582}} \cdot W_{75582} \quad (6)$$

где W_1 – вес 1-го варианта, численно равный вероятности появления варианта №1; W_2 – вес 2-го варианта, численно равный вероятности появления варианта №2; W_{75582} – вес 75582-го варианта, численно равный вероятности появления варианта №75582 (причём, $W_1 + W_2 + \dots + W_{75582} = 1$); $k_{\text{несим_до_1}}$ – коэффициент несимметрии до симметрирования для варианта №1; $k_{\text{несим_до_2}}$ – коэффициент несимметрии до симметрирования для варианта №2; $k_{\text{несим_до_75582}}$ – коэффициент несимметрии до симметрирования для варианта №75582.

Аналогично рассчитываются суммарные коэффициенты для коэффициентов несимметрии без поправки на ошибку измерения $k_{\text{несим}}$ и с поправкой на ошибку измерений $k_{\text{несим_ош}}$:

$$k_{\text{сумм_несим}} = k_{\text{несим_1}} \cdot W_1 + k_{\text{несим_2}} \cdot W_2 + \dots + \dots + k_{\text{несим_75582}} \cdot W_{75582} \quad (7)$$

где $k_{\text{несим_1}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования для варианта №1; $k_{\text{несим_2}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования для варианта №2; $k_{\text{несим_75582}}$ – коэффициент

несимметрии после симметрирования для варианта №75582.

$$k_{\text{сумм_несим_ош}} = k_{\text{несим_ош_1}} \cdot W_1 + \dots + k_{\text{несим_ош_2}} \cdot W_2 + \dots + k_{\text{несим_ош_75582}} \cdot W_{75582} \quad (8)$$

где $k_{\text{несим_ош_1}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования с учётом ошибки измерения для варианта №1; $k_{\text{несим_ош_2}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования с учётом ошибки измерения для варианта №2; $k_{\text{несим_ош_75582}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования с учётом ошибки для варианта №75582.

Результаты и их обсуждение

Разность между суммарным коэффициентом до симметрирования и суммарным коэффициентом после симметрирования без учёта ошибки измерения $k_1 = k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим}}$ и разность между суммарным коэффициентом до симметрирования и суммарным коэффициентом после симметрирования с учётом ошибки измерения $k_2 = k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим_ош}}$ показывают величину снижения несимметрии без ошибки измерений и с ошибкой соответственно. Их отношение (9) покажет, во сколько раз изменится снижение несимметрии из-за влияния ошибки измерения по сравнению со снижением несимметрии без неё.

$$k_{12} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим}}}{k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим_ош}}}, \quad (9)$$

$$k_{12\%} = (k_{12} - 1) \cdot 100\% . \quad (10)$$

Коэффициент $k_{12\%}$, показывающий, на сколько процентов изменится снижение несимметрии из-за влияния ошибки (10), является функцией.

Предполагается, что при расчёте мощности приведённая погрешность максимальна. Например, при погрешности $\delta_U = \pm 0,2\%$ для напряжения и $\delta_I = \pm 0,2\%$ для тока величина мощности с учётом погрешности составит максимальную величину $P_{\text{ош}}$

$$P_{\text{ош}} = (1 + \max(\delta_U)) \cdot (1 + \max(\delta_I)) \cdot P = 1,004004 \cdot P, \quad (11)$$

где P – истинное значение мощности.

Коэффициент несимметрии в виде среднего отклонения по мощности – есть функция, аргументами которой являются мощности фаз А, В, С. Предполагается, что погрешность оказывает максимальное влияние и на коэффициент несимметрии. Для этого погрешность в определении мощности наиболее нагруженной фазы должна иметь максимальное значение, погрешность в определении мощности остальных двух фаз должны быть равны нулю. Зависимость $k_{12\%}(\delta)$ представлена ниже.

Зависимость коэффициента $k_{12\%}$ от инструментальной погрешности

The dependence of $k_{12\%}$ coefficient on the instrumental error

$\delta, \%$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0	6,0
$k_{12\%}$	0	0	0	0	0	0	37,79	37,79	37,79	5521,54

Выводы. Таким образом, рассмотрены основные особенности применения датчиков тока и напряжения при определении коэффициента несимметрии электрической сети. Важным вопросом является инструментальная точ-

ность датчиков тока и напряжения. Установлено, что при погрешностях средств измерения тока и напряжения $\delta \leq 1\%$ влияние на определение коэффициента несимметрии не оказывается.

Список литературы

1. Чекмарев А. Датчики тока и напряжения АВВ – от печатной платы до преобразователей-гигантов // Силовая электроника. 2006. №3. С.56-57.
2. Индустриальные датчики тока и напряжения. URL: http://infiber.ru/products/optoisolation/plastic_optocouplers/isolation_amplifiers.html (дата обращения: 06.06.2019).
3. Закурдаев Р.Ю., Чернецкая И.Е. Математическое обоснование снижения несимметрии в сети электроснабжения вычислительной техники // Телекоммуникации. 2019. №2. С. 35-42.
4. Закурдаев Р.Ю., Чернецкая И.Е. Обзор существующего инструментария для снижения несимметрии и анализ его соответствия современному и перспективному

уровню информатизации коммунально-бытовых электрических сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. №5(74). С. 16-24.

5. Реймов К.М., Хасанов М.Ю. Способ уменьшения несимметрии в трехфазных электрических сетях // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. 2016. №14. С. 203-210.

6. Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е. Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. 2015. №4 (47). С. 35-42.

7. Андреева З.А., Венедиктов С.В., Богомолов А.А., Державин А.С. Технические потери от перекоса фаз и меры по их снижению // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2014. №7. С. 32-37.

8. Егоров М.Ю., Самарин Г.Н. Аспекты внедрения и разработки устройства симметрирования напряжений // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 2(17). С. 188-194.

9. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Алгоритмы управления трехфазным устройством выравнивания нагрузки электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 162-172.

10. Андреева З.А., Венедиктов С.В., Богомолов А.А., Державин А.С. Технические потери от перекоса фаз и меры по их снижению // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2014. №7. С. 32-37.

11. Черкашина Г.И. Симметрирование режимов работы системы электроснабжения бытового сектора // Энергосбережение, энергетика, аудит. 2015. №4. С. 21-28.

Reference

1. Chekmarev A. Datchiki toka i napryazheniya ABB – ot pechatnoy platy do preobrazovateley-gigantov [ABB Current and Voltage Sensors - From PCBs to Gigantic Converters]. *Silovaya elektronika = Power electronics*, 2006. no.3, pp. 56-57 (In Russ.).

2. Industrial'nyye datchiki toka i napryazheniya [Industrial current and voltage sensors]. Available at: http://infiber.ru/products/optoisolation/plastic_optocouplers/isolation_amplifiers.html (accessed: 06.06.2019) (In Russ.).

3. Zakurdayev R.YU., Chernetskaya I.Ye. Matematicheskoye obosnovaniye snizheniya nesimmetrii v seti elektrosnabzheniya vychislitel'noy tekhniki [The mathematical justification for reducing asymmetries in the power supply network of computer technology]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2019, no. 2, pp. 35-42 (In Russ.).

4. Zakurdayev R.YU., Chernetskaya I.Ye. Obzor sushchestvuyushchego instrumentariya dlya snizheniya nesimmetrii i analiz yego sootvetstviya sovremennomu i perspektivnomu уровню informatizatsii kommunal'no-bytovykh elektricheskikh setey [Review of existing tools for reducing asymmetry and analysis of its compliance with the current and future level of informatization of household electrical networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, no.5(74), pp. 16-24 (In Russ.).

5. Reymov K.M., Khasanov M.YU. Sposob umen'sheniya nesimmetrii v trekhfaznykh elektricheskikh setyakh [A method of reducing asymmetry in three-phase electrical net-

works]. *Infrastrukturnyye otrasli ekonomiki: problemy i perspektivy razvitiya* = *Infrastructure sectors of the economy: problems and development prospects*, 2016, no.14, pp. 203-210 (In Russ.).

6. Dulepov D.Ye., Tyundina T.Ye. Raschet nesimmetrii napryazheniy SES [Calculation of voltage unbalance in power supply systems]. *Vestnik NGIEI* = *Herald NGIEI*, 2015, no.4 (47), pp. 35-42 (In Russ.).

7. Andreyeva Z.A., Venediktov S.V., Bogomolov A.A., Derzhavin A.S. Tekhnicheskiye poteri ot perekosa faz i mery po ikh snizheniyu [Technical losses from phase imbalance and measures to reduce them]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy i puti ikh resheniya* = *Modern science: current problems and solutions*, 2014, no.7, pp. 32-37 (In Russ.).

8. Yegorov M.YU., Samarin G.N. Aspekty vnedreniya i razrabotki ustroystva simmetrirovaniya napryazheniy [Aspects of implementation and development of a voltage balancing device]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* = *Agriculture Innovation*, 2016, no. 2(17), pp. 188-194 (In Russ.).

9. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'yev A.A. Algoritmy upravleniya trekhfaznym ustroystvom vyravnivaniya nagruzki elektricheskoy seti [Algorithms for controlling a three-phase load balancer]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* = *Bulletin of the Chuvash University*, 2017, no. 1, pp. 162-172 (In Russ.).

10. Andreyeva Z.A., Venediktov S.V., Bogomolov A.A., Derzhavin A.S. Tekhnicheskie poteri ot perekosa faz i mery po ikh snizheniyu [Technical losses from phase imbalance and measures to reduce them]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy i puti ikh resheniya* = *Modern science: current problems and solutions*, 2014, no.7, pp. 32-37 (In Russ.).

11. Cherkashina G.I. Simmetrirovaniye rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya bytovogo sektora [Balancing the operating modes of the household electricity] *Energosberezheniye, energetika, audit* = *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2015, no.4, pp. 21-28 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Роман Юрьевич Закурдаев, аспирант, кафедра вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: romanzakurdaev@yandex.ru

Roman Yu. Zakurdaev, Post-Graduate Student, Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: romanzakurdaev@yandex.ru

Ирина Евгеньевна Чернецкая, доктор технических наук, профессор, кафедра вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: white731@yandex.ru

Irina E. Chernetskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: white731@yandex.ru