

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

УДК 621.31

DOI 10.37493/2307-907X.2022.3.1

Петров Антон Васильевич, Костюков Дмитрий Александрович**СПОСОБ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ТРЕХФАЗНОГО СИГНАЛА
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

Работа посвящена развитию методов оценки уровня несимметрии токов и напряжений в трехфазных электрических сетях. Основным направлением исследований в данной работе является создание достаточно простого аппаратно-ориентированного способа выделения симметричных составляющих из несимметричной трехфазной системы векторов. В работе предлагается новый алгоритм цифровой обработки сигналов трехфазной системы напряжений и/или токов, позволяющий реализовать функцию цифрового фильтра симметричных составляющих. Основой работы алгоритма являются результаты синхронных измерений мгновенных напряжений и/или токов. В алгоритме отсутствует необходимость в определении угловых соотношений векторов трехфазной системы. Помимо этого, алгоритм освобожден от необходимости использования комплексных чисел при вычислениях симметричных составляющих. Результатом работы алгоритма являются осциллограммы симметричных составляющих, представленные в виде множеств дискретных отсчетов. В основе алгоритма лежат простейшие арифметические действия с мгновенными значениями синхронно измеряемых параметров трехфазной системы. Предлагаемый алгоритм позволяет снизить требования к вычислительной мощности средств измерений без потери точности оценки векторов симметричных составляющих. Алгоритм может быть использован для реализации на его базе цифровых фильтров прямой, обратной или нулевой последовательности напряжений и/или токов.

Ключевые слова: трехфазная сеть; несимметрия; симметричные составляющие; цифровой фильтр; цифровая обработка сигналов.

Anton Petrov, Dmitrii Kostyukov**METHOD FOR DIGITAL PROCESSING OF A THREE-PHASE SIGNAL
FOR EXTRACTION SYMMETRIC COMPONENTS**

The paper proposes to the development of methods for assessing the level of current and voltage asymmetry in three-phase electrical networks. The main direction of research in this work is the creation of a simple hardware-oriented method for extracting symmetrical components from an asymmetric three-phase system of vectors. The paper proposes a new algorithm for digital signal processing of a three-phase system of voltages and/or currents, which makes it possible to implement the function of a digital filter of symmetrical components. The algorithm is based on the results of synchronous measurements of instantaneous voltages and/or currents. There is no need in the algorithm to determine the angular ratios of the three-phase system vectors. In addition, the algorithm is freed from the need to use complex numbers when calculating symmetric components. The result of the algorithm is oscillograms of symmetrical components, presented as sets of discrete samples. The algorithm is based on the simplest arithmetic operations with instantaneous values of synchronously measured parameters of a three-phase system. The proposed algorithm makes it possible to reduce the requirements for the computing power of measuring instruments without losing the accuracy of estimating the vectors of symmetrical components. The algorithm can be used to implement on its basis digital filters of positive, negative or zero-sequence voltages and/or currents.

Key words: three-phase network; asymmetry; symmetrical components; digital filter; digital signal processing.

Введение / Introduction. Одним из основных параметров, определяющих качество электроэнергии в трехфазных электрических сетях общего назначения, является несимметрия напряжений, вызывающая ряд негативных явлений, в т. ч. увеличение потерь в элементах сети и электроприемниках, нарушение режимов работы электрооборудования, отклонение напряжений на зажимах однофазных потребителей и т. д. [1–4].

Существующая тенденция развития электросетевого комплекса подразумевает реализацию концепции «умной энергетики» (SmartGrid) на уровне всех классов напряжений, включая распределительные сети низкого напряжения и системы внутреннего электроснабжения [5–7]. При этом неотъемлемой частью концепции SmartGrid является система Smart Metering [7], предполагающая реализацию алгоритмов интеллектуальных измерений, в т. ч. и в области мониторинга качества электроэнергии [8, 9].

Таким образом, становится актуальной задача разработки относительно простых, но достаточно точных и эффективных алгоритмов оценки показателей качества электроэнергии, возможных к реализации на недорогих микропроцессорах, входящих в состав интеллектуальных систем учета электроэнергии.

Надо отметить, что несимметрия напряжений в низковольтной распределительной сети, как правило, является следствием несимметрии нагрузок [10, 11]. Соответственно для эффективного управления и оптимизации режимов работы этих сетей требуется мониторинг не только несимметрии напряжений, но и несимметрии токов. В особенности это становится актуальным при решении задач, связанных с выявлением степени вклада того или иного потребителя в уровень несимметрии [11–13].

В рамках данной работы раскрывается суть алгоритма цифровой обработки дискретных сигналов, полученных на основе синхронных измерений трехфазной системы векторов напряжений и/или токов и позволяющего в режиме фильтра выделять симметричные составляющие в темпе процесса измерений. Предлагаемый алгоритм освобожден от необходимости определения угловых соотношений между векторами трехфазной системы, а также позволяет отказаться от вычислительных процедур, связанных с использованием комплексных чисел.

Материалы и методы / Materials and methods. В основе большинства существующих подходов к оценке несимметричных режимов лежит широко известный метод симметричных составляющих, согласно которому несимметричная система может быть разложена на три последовательности: прямую, обратную и нулевую [14]:

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{3}(\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}); \quad (1)$$

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{3}(\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}); \quad (2)$$

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}), \quad (3)$$

здесь a – комплексный оператор поворота, равный:

$$a = e^{+j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad (4)$$

$$a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (5)$$

Таким образом, классический метод предполагает выполнение операций с комплексными числами, для чего требуется определение не только модулей векторов трехфазной системы, но и их угловых соотношений. При этом угловые соотношения могут быть определены аппаратно, либо аналитически.

Аппаратное определение углов между векторами трехфазной системы сопряжено с необходимостью усложнения средств измерения и, помимо этого, может являться источником дополнительной погрешности, особенно в условиях «засоренности» спектров измеряемых сигналов.

Аналитическое определение угловых сдвигов между векторами может быть реализовано на основе известных геометрических и тригонометрических соотношений [15]. Однако данный подход также не лишен недостатков, в числе которых:

- усложнение процедуры расчета по причине необходимости выполнения дополнительных вычислений углов;
- необходимость предварительной фильтрации измеряемых сигналов в условиях несинусоидальности измеряемых параметров.

Из изложенного следует, что реализация метода симметричных составляющих в его классическом виде предъявляет к интеллектуальным средствам измерения относительно высокие требования и при этом не гарантирует высокой точности результата без дополнительных процедур, таких как предварительная фильтрация измеряемых параметров.

Рассмотрим классический метод расчета с другой стороны. Реализация формул (1) и (2) в том виде, как они приводятся в литературе, предполагает поворот векторов измеряемых фазных параметров (токов или напряжений) на углы, заданные оператором поворота с последующим их геометрическим сложением. Именно так трактуется и геометрически интерпретируется метод симметричных составляющих в научной и учебной литературе, например в [14] и [15]. Т. е. изначально предполагается работа с векторами в комплексной плоскости.

Однако если перейти из пространства комплексных чисел в область временных процессов, то формулы (1) и (2) можно рассматривать уже под несколько другим углом. Здесь поворот вектора на заданный угол можно представить как сдвиг сигнала вдоль оси времени (рис. 1), а сумму векторов рассматривать как результат сложения мгновенных значений сигналов (рис. 2).

Математически данные утверждения можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{U} \Rightarrow U_m \sin(\omega t) \\ a \cdot \dot{U} = \dot{U} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \Rightarrow U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 \Rightarrow u_1(t) + u_2(t) \end{cases} \quad (6)$$

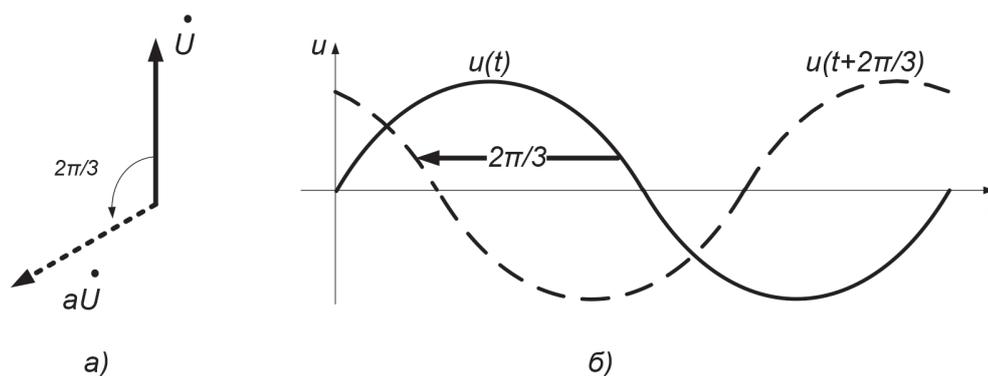


Рис. 1. Операция поворота вектора (а) и соответствующий ей сдвиг сигнала (б)

В условиях цифрового дискретного измерения сигналов такой подход может оказаться гораздо более удобным с точки зрения не только экономии вычислительных ресурсов, но и повышения точности за счет упрощения алгоритма вычислений без внесения в него методической погрешности.

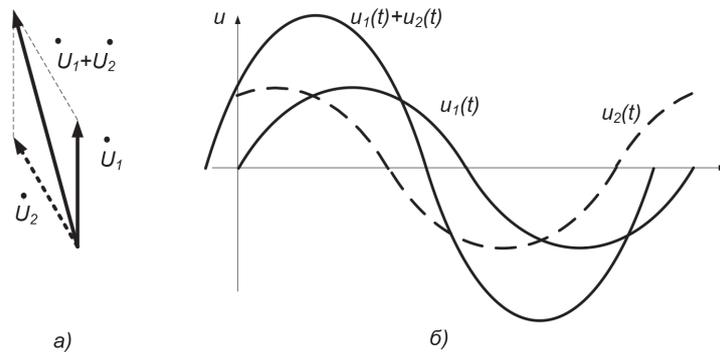


Рис. 2. Операция сложения векторов (а) и соответствующая ей операция сложения сигналов (б)

Результаты и обсуждение / Results and discussion. В данной работе предлагается алгоритм оценки симметричных составляющих, на основе обработки синхронизированных мгновенных измерений фазных параметров (напряжений или токов). Предлагаемый способ не предусматривает определения угловых соотношений между векторами трехфазной системы, но при этом способ базируется на классическом методе симметричных составляющих. Однако оператор поворота, применяемый в классическом методе, вводится в виде сдвига единичных отсчетов дискретных измерений сигналов. В дальнейшем условимся называть его «дискретным сдвигом».

Нулевая последовательность трехфазной системы векторов может быть получена достаточно просто посредством прямого сложения синхронизированных измерений мгновенных значений фазных напряжений. Результатом работы алгоритма является дискретная последовательность (дискретная осциллограмма) мгновенных значений, каждое из которых представляет собой сумму синхронизированных результатов измерения фазных параметров:

$$\begin{cases} u_{(0)i} = \frac{1}{3} [u_{(A)i} + u_{(B)i} + u_{(C)i}] \\ i_{(0)i} = \frac{1}{3} [i_{(A)i} + i_{(B)i} + i_{(C)i}] \end{cases}, \quad (7)$$

где $u_{(A)i}$, $u_{(B)i}$, $u_{(C)i}$ ($i_{(A)i}$, $i_{(B)i}$, $i_{(C)i}$) – единичные синхронные отсчеты фазных напряжений (токов).

Суммировать мгновенные значения сигналов можно непосредственно на выходе блока аналого-цифрового преобразования. Таким образом, формируются множества $\{u_{(0)i}\}$ и / или $\{i_{(0)i}\}$, которые представляют собой дискретные осциллограммы напряжения и / или тока нулевой последовательности. При необходимости действующее значение напряжения (тока) нулевой последовательности определяется достаточно просто:

$$\begin{cases} U_0 = \sqrt{\frac{\sum_N u_{(0)i}^2}{N}} \\ I_0 = \sqrt{\frac{\sum_N i_{(0)i}^2}{N}} \end{cases}, \quad (8)$$

где N – количество измерений за период.

Данный подход нельзя назвать абсолютно новым, поскольку в аналоговом виде он уже давно используется в различных фильтрах нулевой последовательности, в т. ч. и в трансформаторах нулевой последовательности, где суммирование осуществляется в магнитной системе посредством сложения магнитных потоков. Тем не менее данный подход (в виде дискретного суммирования) является отправной точкой его трансформации для расчета прямой и обратной последовательностей.

При расчете прямой и обратной последовательностей алгоритм несколько усложняется. Вместо оператора поворота, используемого в (1) и (2), в расчете используется дискретный сдвиг на $1/3$ периода. Процесс формирования множества $\{u_{(1)i}\}$ единичных мгновенных значений прямой последовательности на основе множеств $\{u_{(A)i}\}$, $\{u_{(B)i}\}$ и $\{u_{(C)i}\}$, полученных посредством синхронных измерений фазных напряжений описывается следующим выражением:

$$u_{(1)i} = \frac{1}{3} \left[u_{(A)i} + u_{(B)i + \frac{N}{3}} + u_{(C)i + \frac{2N}{3}} \right], \quad (9)$$

здесь введение в индексы фаз «В» и «С» слагаемых $N/3$ и $2N/3$ можно рассматривать как фиктивный разворот векторов UA и UB на углы $\pi/3$ и $2\pi/3$ соответственно.

Для формирования множества $\{u_{(2)i}\}$ мгновенных значений напряжения обратной последовательности процедура расчета аналогична (9), но при этом индексы дискретного сдвига меняют свою принадлежность относительно фаз «В» и «С»:

$$u_{(2)i} = \frac{1}{3} \left[u_{(A)i} + u_{(B)i + \frac{2N}{3}} + u_{(C)i + \frac{N}{3}} \right], \quad (10)$$

Расчет действующего значения результирующих напряжений может быть осуществлен аналогично тому, как он производится для нулевой последовательности с использованием выражения (8).

Процесс получения множеств мгновенных значений различных последовательностей поясняется графиками на рис. 3–5.

Для токов расчет проводится аналогично. Так, для прямой последовательности:

$$i_{(1)i} = \frac{1}{3} \left[i_{(A)i} + i_{(B)i + \frac{N}{3}} + i_{(C)i + \frac{2N}{3}} \right], \quad (11)$$

и для обратной последовательности:

$$i_{(2)i} = \frac{1}{3} \left[i_{(A)i} + i_{(B)i + \frac{2N}{3}} + i_{(C)i + \frac{N}{3}} \right], \quad (12)$$

Апробация предлагаемого способа на дискретной компьютерной модели показала его работоспособность и полное отсутствие методической погрешности в условиях гармонических сигналов трехфазной системы.

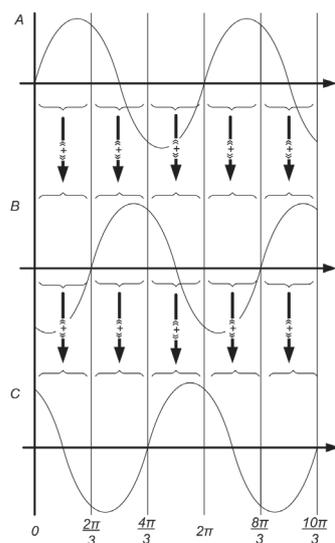


Рис. 3. Процесс получения множества дискретных значений сигнала нулевой последовательности

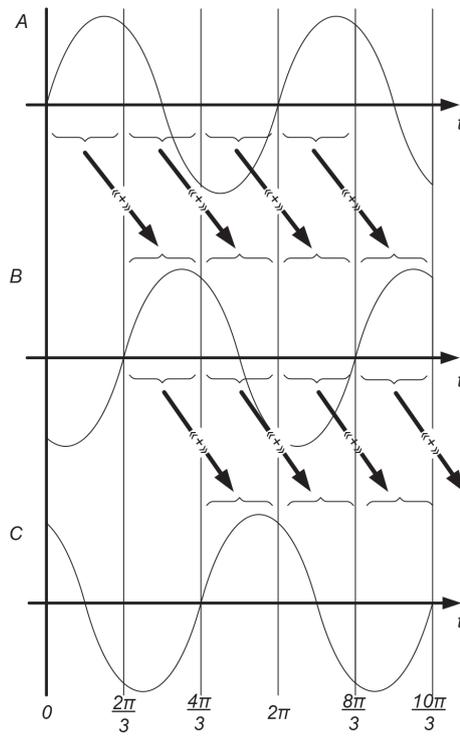


Рис. 4. Процесс получения множества дискретных значений сигнала прямой последовательности

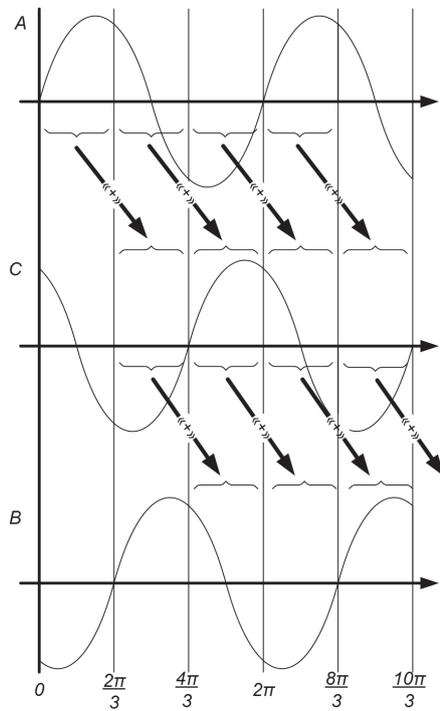


Рис. 5. Процесс получения множества дискретных значений сигнала обратной последовательности

Заключение / Conclusion. Предлагаемый способ выделения симметричных составляющих на основе синхронизированных измерений параметров трехфазного сигнала удобен тем, что освобожден от необходимости выполнения операций с комплексными числами, а также в отличие от классического метода не требует определения угловых сдвигов векторов трехфазной системы.

На основе данного способа могут быть реализованы цифровые фильтры симметричных составляющих, работающие в потоковом режиме и не требующие значительных вычислительных мощностей.

ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. Парсентьев, О. С. Анализ дополнительных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях, образованных несимметрией распределения нагрузки / О. С. Парсентьев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2019. – № 12(30). – С. 136–151.
2. Громков, А. С. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников и способы повышения показателей качества электроэнергии / А. С. Громков // Экономика и социум. – 2020. – № 4(71). – С. 253–256.
3. Петров, А. В. Разработка инженерных методов оценки несимметрии напряжений в сетях 10–0,4 кВ : специальность 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петров Антон Васильевич. – Ставрополь, 2003. – 200 с.
4. Жежеленко, И. В. Оценка потерь электрической энергии, вызванных снижением ее качества / И. В. Жежеленко, В. В. Нестерович // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – № 34. – С. 119–126.
5. Бычков, Е. В. Новые возможности малой энергетики на принципах SmartGrid / Е. В. Бычков, А. Б. Васенин, О. В. Крюков // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2019. – № 10(123). – С. 40–50.
6. Алинов, М. Ш. Smartgrid – умная энергетика: перспективы и барьеры / М. Ш. Алинов, А. Г. Алинов // Российские регионы в фокусе перемен : сборник докладов XIII Международной конференции, Екатеринбург, 15–17 ноября 2018 года. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2019. – С. 111–115.
7. Кононов, Ю. Г. Перспективы применения интеллектуальных информационно-измерительных систем в электрических сетях / Ю. Г. Кононов, Р. Н. Липский // Электроэнергетика глазами молодежи – 2020 : материалы XI Международной НТК, Ставрополь, 15–17 сентября 2020 года : в 2 т. – Ставрополь : Изд-во СКФУ, 2020. – С. 46–57.
8. Чупрова, И. А. Особенности внедрения smart metering / И. А. Чупрова // Электроэнергетика. Энергия – 2019 : материалы конференции, Иваново, 02–04 апреля 2019 года : в 7 т. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2019. – С. 34.
9. Баранова, К. С. Интеллектуальная система smart metering и АСКУЭ / К. С. Баранова, А. В. Горбань // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 8. – № 1. – С. 7.
10. Троицкий, А. И. Обобщение понятия несимметричные нагрузки с целью их внутреннего симметрирования по критерию снижения потерь мощности / А. И. Троицкий, С. С. Костинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 126–131.
11. Костюков, Д. А. Оценка долевого вклада потребителя в несимметрию напряжений по обратной последовательности в сетях с изолированной нейтралью / Д. А. Костюков, А. В. Петров, А. Е. Куц // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 5(68). – С. 7–18.
12. Костюков, Д. А. Оценка вклада потребителя в несимметрию напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения / Д. А. Костюков // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 6(69). – С. 24–34.
13. Анализ методов оценки долевого вклада потребителей в уровень несимметрии напряжений в точке общего присоединения / Д. А. Костюков, А. В. Петров, А. Е. Куц, А. А. Васильев // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы 7-й (64) ежегодной НПК преподавателей, студентов и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону», Ставрополь, 03–29 апреля 2019 года. – Ставрополь : Изд. дом «Тэсэра», 2019. – С. 50–53.

14. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник: в 2 ч. / Л. А. Бессонов, В. Л. Бессонов. – Ч. 1. – 12-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2016. – 364 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-9301-1.
15. Кобозев В. А. Расчет комплексных показателей несимметрии напряжений в электрических сетях / В. А. Кобозев, П. В. Коваленко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2004. – № 4. – С. 50-53.

REFERENCES AND INTERNET RESOURCES

1. Parsent'ev, O. S. Analiz dopolnitel'nyh poter' elektroenergii v raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah, obrazovannyh nesimmetriey raspredeleniya nagruzki (Analysis of Additional Electricity Losses in Distribution Electric Networks, Formed by Unbalance in Load Distribution) / O. S. Parsent'ev // Vestnik Luganskogo nacional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya. – 2019. – № 12(30). – S. 136–151.
2. Gromkov, A. S. Vliyanie kachestva elektroenergii na rabotu elektropriemnikov i sposoby povysheniya pokazatelei kachestva elektroenergii (The influence of power quality on the operation of power receivers and ways to improve power quality indicators) / A. S. Gromkov // Ekonomika i socium. – 2020. – № 4(71). – S. 253-256.
3. Petrov, A. V. Razrabotka inzhenernykh metodov ocenki nesimmetrii napryazhenij v setyah 10–0,4 kV : spetsial'nost' 05.14.02 Elektricheskie stancii i elektroenergeticheskie sistemy (Development of engineering methods for assessing voltage unbalance in 10–0.4 kV networks) : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnikeskikh nauk / Petrov Anton Vasil'evich. – Stavropol', 2003. – 200 s.
4. Zhezhelenko, I. V. Ocenka poter' elektricheskoy energii, vyzvannyh snizheniem ee kachestva (Assessment of electrical energy losses caused by a decrease in its quality) / I. V. Zhezhelenko, V. V. Nesterovich // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki. – 2017. – № 34. – S. 119–126.
5. Bychkov, E. V. Novye vozmozhnosti maloj energetiki na principah SmartGrid (New opportunities for small-scale power generation based on SmartGrid principles) / E. V. Bychkov, A. B. Vasenin, O. V. Kryukov // Avtomatizatsiya i IT v energetike. – 2019. – № 10(123). – S. 40–50.
6. Alinov, M. Sh. Smartgrid – umnaya energetika: perspektivy i bar'ery (Smartgrid – smart energy: prospects and barriers) / M. Sh. Alinov, A. G. Alinov // Rossijskie regiony v fokuse peremen : sbornik dokladov XIII Mezhdunarodnoj konferencii, Ekaterinburg, 15–17 noyabrya 2018 goda. – Ekaterinburg : Izd-vo UMTs UPI, 2019. – S. 111–115.
7. Kononov, Yu. G. Perspektivy primeneniya intellektual'nykh informacionno-izmeritel'nykh sistem v elektricheskikh setyah (Prospects for the use of intelligent information-measuring systems in electrical networks) / Yu. G. Kononov, R. N. Lipskii // Elektroenergetika glazami molodezhi. – 2020 : materialy XI Mezhdunarodnoj NTK, Stavropol', 15–17 sentyabrya 2020 goda : v 2 t. – Stavropol' : Severo-Kavkazskij federal'nyj universitet, 2020. – S. 46–57.
8. Chuprova, I. A. Osobennosti vnedreniya smart metering (Features of implementing smart metering) / I. A. Chuprova // Elektroenergetika. Energiya-2019 : materialy konferencii, Ivanovo, 02–04 aprelya 2019 goda : v 7 t. – Ivanovo : Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet im. V. I. Lenina, 2019. – S. 34.
9. Baranova, K. S. Intellektual'naya sistema smart metering i ASKUE (Intelligent smart metering system and ACEMS) / K. S. Baranova, A. V. Gorban' // Molodezhnyj vestnik IrGTU. – 2018. – T. 8. – № 1. – S. 7.
10. Troickij, A. I. Obobshchenie ponyatiya nesimmetrichnye nagruzki s cel'yu ih vnutrennego simmetrirovaniya po kriteriyu snizheniya poter' moshchnosti (Generalization of the concept of asymmetric loads for the purpose of their internal balancing according to the criterion of reducing power losses) / A. I. Troickij, S. S. Kostinskij // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. – 2013. – № 1. – S. 126–131.
11. Kostyukov, D. A. Ocenka dolevogo vklada potrebitelya v nesimetriyu napryazhenii po obratnoj posledovatel'nosti v setyah s izolirovannoj neutral'yu (Estimation of the share contribution of the consumer to the voltage unbalance in reverse sequence in networks with isolated neutral) / D. A. Kostyukov, A. V. Petrov, A. E. Kushch // Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. – 2018. – № 5(68). – S. 7-18.
12. Kostyukov, D. A. Ocenka vklada potrebitelya v nesimetriyu napryazhenii po nulevoi posledovatel'nosti v tochke obshchego prisoedineniya (Estimation of the consumer's contribution to the voltage asymmetry by zero sequence at the point of common connection) / D. A. Kostyukov // Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. – 2018. – № 6(69). – S. 24–34.

13. Analiz metodov ocenki dolevogo vklada potrebitel'ev v uroven' nesimmetrii napryazhenij v tochke obshchego prisoedineniya (Analysis of methods for assessing the share contribution of consumers to the level of voltage asymmetry at the point of common connection) / D. A. Kostyukov, A. V. Petrov, A. E. Kushch, A. A. Vasil'ev // Aktual'nye problemy inzhenernykh nauk : materialy VII (64) ezhegodnoj NPK prepodavatelej, studentov i molodyh uchenykh Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta «Universitetskaya nauka-regionu», Stavropol', 03–29 aprelya 2019 goda. – Stavropol' : Izd. dom «Tesera», 2019. – S. 50–53.
14. Bessonov, L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cipi : v 2 ch.: uchebnik (Theoretical foundations of electrical engineering. Electric circuits) / L. A. Bessonov, V. L. Bessonov. – CH. 1 – 12-e izd., ispr. i dop. – Moskva : Yurait, 2016. – 364 s. – (Bakalavr. Akademicheskii kurs). – ISBN 978-5-9916-9301-1.
15. Kobozev, V. A. Raschet kompleksnykh pokazatelej nesimmetrii napryazhenij v elektricheskikh setyah (Calculation of complex indicators of voltage asymmetry in electrical networks) / V. A. Kobozev, P. V. Kovalenko // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika. – 2004 – № 4. – S. 50–53.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Антон Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, СКФУ. E-mail: anvpetrov@ncfu.ru.

Костюков Дмитрий Александрович, старший преподаватель кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, СКФУ E-mail: dkostiukov@ncfu.ru.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Petrov Anton, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department Automated Electric Power Systems and Power Supply, NCFU. E-mail: anvpetrov@ncfu.ru.

Kostiukov Dmitry, senior lecturer of the Department Automated Electric Power Systems and Power Supply, NCFU. E-mail: dkostiukov@ncfu.ru.