

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 620.9

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.3>

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ СИЛЫ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Александр Александрович Пестерев^{1*}, Сергей Сергеевич Костинский²,
Нури Дазмирович Наракидзе³

^{1, 2, 3} Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова (д. 132, ул. Просвещения, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация)

¹ saniki26@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>

² mirovingen1987@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>

³ ndaz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3760-4003>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Тенденция роста количества и повышения установленной мощности однофазных нелинейных электроприемников приводит к ухудшению качества электроэнергии. Одним из критериев оценки качества электрической энергии являются показатели несимметрии по нулевой и обратной последовательностям. Причем коэффициент несимметрии по нулевой последовательности обусловлен величиной силы тока нулевой последовательности. **Цель.** Эмпирически обосновать преимущества применения метода, основанного на измерении мгновенных значений силы тока синхронно по трем фазам за один период для оценки коэффициента несимметрии по нулевой последовательности, по сравнению с методом симметричных составляющих, реализуемого с использованием оператора поворота, для более точной оценки несимметрии силы токов в распределительных электрических сетях. **Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели был разработан и собран экспериментальный стенд системы электроснабжения. Разработанный стенд позволил получить совокупность синхронно измеренных мгновенных значений силы тока и напряжения по каждой фазе, а также в нулевом рабочем проводнике при изменении величины, характера и несинусоидальности нагрузки независимо по каждой фазе. При этом критерием оценки точности расчета коэффициента несимметрии по нулевой последовательности являлась величина силы тока, измеренная в нулевом рабочем проводнике. **Результаты и обсуждение.** Использование базового метода симметричных составляющих для определения силы тока нулевой последовательности в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке приводит к недопустимой погрешности, медианное значение которой составляет 21,25 %. С целью снижения указанной погрешности рекомендуется в этих режимах использовать метод, основанный на измерении мгновенных значений силы тока синхронно по трем фазам за один период, при этом медианное значение погрешности не превышает 0,16 %. **Заключение.** Для снижения величин погрешностей расчета силы тока нулевой последовательности рекомендуется применять метод, основанный на измерении мгновенных значений силы тока синхронно по трем фазам за один период.

Ключевые слова: метод симметричных составляющих, несимметрия токов, метод оценки симметричных составляющих по мгновенным значениям силы тока, однофазные нелинейные электроприемники

Для цитирования: Пестерев А. А., Костинский С. С., Наракидзе Н. Д. Эмпирическое обоснование преимущества применения модифицированного метода симметричных составляющих для оценки величины силы тока нулевой последовательности в распределительных электрических сетях // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 4 (103). С. 28–38. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.3>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024;
одобрена после рецензирования 04.07.2024;
принята к публикации 12.07.2024.

Research article

EMPIRICAL SUBSTANTIATION OF THE ADVANTAGE OF USING THE MODIFIED METHOD OF SYMMETRICAL COMPONENTS TO ESTIMATE THE VALUE OF ZERO-SEQUENCE CURRENT IN DISTRIBUTION GRIDS

Aleksandr A. Pesterev ^{1*}, Sergey S. Kostinskiy ², Nuri D. Narakidze³

^{1, 2, 3} South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M. I. Platov (132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation)

¹ saniki26@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>

² mirovingen1987@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>

³ ndaz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3760-4003>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. The tendency of growth in the number and increase in the installed capacity of single-phase non-linear electric consumers leads to the deterioration of power quality. One of the criteria for assessing the quality of electric power is the zero-sequence and reverse sequence asymmetry indices. And the zero-sequence asymmetry coefficient is conditioned by the zero-sequence current strength. **Goal.** To empirically substantiate the advantages of using the method based on the measurement of instantaneous values of current strength synchronously on three phases for one period to estimate the zero-sequence asymmetry coefficient, as compared to the method of symmetrical components, implemented using the turnaround operator, for a more accurate assessment of current strength asymmetry in distribution networks. **Materials and methods.** To achieve the set goal, an experimental stand of the power supply system was designed and assembled. The developed stand allowed to obtain a set of synchronously measured instantaneous values of current and voltage in each phase, as well as in the zero working conductor, when the magnitude, nature and non-sinusoidality of the load changes independently in each phase. In this case, the criterion for assessing the accuracy of calculation of the zero-sequence asymmetry coefficient was the value of current measured in the neutral working conductor. **Results and discussion.** The use of the basic method of symmetrical components to determine the zero sequence current in the case of amplitude-phase asymmetry under active-inductive non-sinusoidal load leads to an unacceptable error, the median value of which is 21.25%. In order to reduce this error it is recommended to use in these modes the method based on the measurement of instantaneous values of current synchronously on three phases for one period, in this case the median value of the error does not exceed 0.16 %. **Conclusion.** To reduce the zero-sequence current calculation errors, it is recommended to use a method based on the measurement of instantaneous current values synchronously on three phases for one period.

Keywords: method of symmetrical components, current asymmetry, method of estimating symmetrical components by instantaneous values of currents, single-phase nonlinear electric receivers

For citation: Pesterev AA, Kostinskiy SS, Narakidze ND. Empirical substantiation of the advantage of using the modified method of symmetrical components to estimate the value of zero-sequence current in distribution grids. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;4(103):28-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.3>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 03.06.2024;

approved after reviewing 04.07.2024;

accepted for publication 12.07.2024.

Введение / Introduction. Проблема анализа качества электроэнергии в низковольтных распределительных сетях 0,4 кВ является актуальной научно-технической задачей, в том числе ввиду продолжающейся в XXI столетии тенденции роста количества и повышения установленной мощности однофазных нелинейных электроприемников [1–4]. Вопросом проблемы анализа качества электрической энергии занимаются и на международном уровне [5, 6] такие ученые, как Baggini, De Almeida, Moreira и др. В связи с этим обеспечение электропотребителей электроэнергией надлежащего качества является важной задачей при проектировании и эксплуатации системы электроснабжения, так как ухудшение качества электроэнергии приводит к негативным эффектам и сказывается как на эксплуатации системы электроснабжения, так и на подключенных к ней электроприемниках и приводит к зависимости работы оборудования от качества электрической энергии.

В ходе эксплуатации систем электроснабжения возможно ухудшение качества электрической энергии в определенных режимах работы сети. В частности, авторами [7] при помощи компьютерной модели было проведено исследование по влиянию снижения сопротивления нулевого проводника при различном характере нагрузки сети на качество электрической энергии за счет снижения несимметрии напряжений по фазам в этой сети.

Одним из важных параметров оценки качества электроэнергии является оценка величины несимметрии напряжений и токов в трехфазных сетях. Явление несимметрии приводит к снижению эффективности процессов передачи и распределения электрической энергии вследствие появления дополнительных потерь в распределительных электрических сетях [8, 9]. Также стоит отметить, что несимметрия напряжений и токов ведет к дополнительным потерям электрической энергии в различных компонентах низковольтных сетей [10].

Как принято считать, причиной возникновения несимметрии напряжения и тока в низковольтных трехфазных сетях является неравномерная нагрузка фаз сети [11]. Степень неравномерности распределения нагрузки по фазам можно охарактеризовать при помощи коэффициента, определяемого по формуле [12]

$$K_{\text{нер}} = 3 \cdot \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} \left(1 + 1,5 \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{ф}}} \right) - 1,5 \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{ф}}},$$

где I_A, I_B, I_C – измеренные токовые нагрузки фаз; $R_{\text{н}}, R_{\text{ф}}$ – сопротивления нулевого и фазного проводников соответственно.

Абсолютная и относительная погрешности при определении $K_{\text{нер}}$ являются функциями многих переменных. Их значения прежде всего зависят от соотношения активных сопротивлений нулевого и фазных проводников, а также углов сдвига токов по отношению к напряжению для соответствующих фаз [13]. Поэтому использование приведенной выше формулы в условиях проектирования и анализа эксплуатируемой сети нерационально.

На практике для оценки несимметрии силы токов и напряжений в распределительных электрических сетях наряду с $K_{\text{нер}}$ используют симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей соответствующих величин. Так, в работе [14] авторы оперируют токами прямой, обратной и нулевой последовательностей для определения потерь электроэнергии в несимметричном режиме.

Перечисленные составляющие определяют аналитически с использованием базового метода симметричных составляющих (базовый МСС) [15], применяемого для расчета несимметричных режимов работы электрических сетей. Согласно данному методу, любая несимметричная система векторов ($\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$) при помощи математических формул может быть разложена в виде трех симметричных систем векторов:

- прямой последовательности

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

- обратной последовательности

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

- нулевой последовательности

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

где a – фазный множитель (оператор поворота), равный:

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

Реализация указанного метода на практике сопряжена с определенными трудностями. В частности, не только с измерением модулей векторов трехфазной системы, но и с определением их аргументов (угловых соотношений). Кроме этого, расчет необходимо выполнять в комплексной форме, что предполагает усложнение алгоритма. Аппаратное определение углов между векторами трехфазной системы может послужить источником появления дополнительной погрешности, особенно при наличии высших гармонических составляющих в спектрах измеряемых сигналов.

При наличии нелинейных электроприемников, генерирующих высшие гармонические составляющие в сеть, применение указанного метода не позволяет с допустимой точностью выполнять оценку симметричных составляющих напряжения и силы тока. Это обусловлено тем фактом, что несимметрия токов является лишь одним из факторов возникновения тока в нулевом рабочем проводнике, т. к. наряду с ним происходит преобразование нелинейными электроприемниками части мощности синусоидального тока частотой 50 Гц в мощность гармонических составляющих, возвращаемых обратно в сеть [16, 17].

Для устранения указанных недостатков применения базового МСС, реализуемого с использованием оператора поворота, в работе [18] предложен модифицированный метод определения симметричных составляющих, основанный на обработке синхронизированных мгновенных измерений фазных напряжений или токов (модифицированный МСС с ИМЗ) в основе которого лежит базовый МСС, но без определения угловых соотношений между векторами трехфазной системы. При этом оператор поворота (3), применяемый в базовом МСС, вводится в виде сдвига единичных отсчетов дискретных измерений сигналов. Данный способ позволяет определить нулевую последовательность трехфазной системы векторов силы тока за счёт прямого сложения синхронизированных измерений мгновенных значений силы тока по каждой фазе. Для расчета прямой и обратной последовательностей необходимо произвести дискретный сдвиг на $1/3$ периода измеренных фазных мгновенных значений силы тока, вместо оператора поворота, используемого в выражениях (1) и (2). Преимущество применения предложенного способа заключается в «ухудше» от использования комплексных чисел и угловых сдвигов векторов трехфазной системы.

Критерием для оценки точности при использовании указанных методов расчета симметричных составляющих может являться величина мгновенных значений силы тока измеренных в нулевом рабочем проводнике, т. к. $I_N = 3 \cdot I_0$ (I_N – измеренное значение величины силы тока в нулевом рабочем проводнике; I_0 – величина силы тока нулевой последовательности).

В эпоху цифровизации актуальной становится задача выбора методики расчета величин симметричных составляющих с целью их дальнейшего использования для разработки мероприятий, направленных на снижение дополнительных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. С целью выполнения эмпирического обоснования преимущества применения модифицированного МСС с ИМЗ для оценки симметричных составляющих (по сравнению с базовым МСС), реализуемого с использованием оператора поворота, был разработан и собран экспериментальный стенд, представляющий собой физическую модель системы электроснабжения (рисунок 1).

Разработанный стенд позволил на основе выполненных экспериментов получить совокупности синхронно измеренных мгновенных значений силы тока и напряжения по каждой фазе, а также в нулевом рабочем проводнике при изменении величины, характера и несинусоидальности нагрузки независимо по каждой фазе. При этом мгновенные значения передавались для отображения и записи в файл на ПК (ноутбук) посредством специально разработанной программы. Количество измеренных мгновенных значений силы тока или напряжения за один период составило 333 значения, что соответствует теореме Котельникова для значения верхней частоты 2000 Гц (40-я гармоническая составляющая напряжения переменного тока и силы тока) и позволяет выполнить дискретный сдвиг на $1/3$ периода.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Оценка степени несинусоидальности тока, подразумевающая проведение спектрального анализа полученных с использованием разработанного стенда (рисунок 1) мгновенных значений силы тока, была выполнена с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Однако следует отметить, что для этого потребовалось использовать специальные «оконные» функции, необходимые для подавления несовершенства краевых условий, т. к. для корректной работы алгоритма БПФ необходимо, чтобы массив значений дискретной выборки был степе-

ную двойки, в то время как измеренный массив мгновенных значений силы тока за один период являлся кратным трем, т. к. это необходимо для реализации модифицированного МСС с ИМЗ.

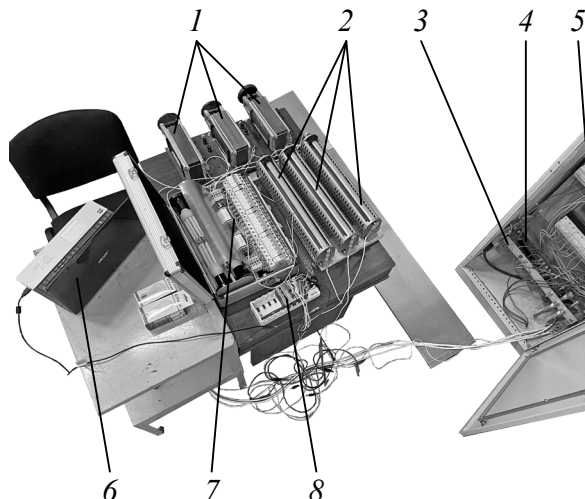


Рис. 1. Стенд для исследования изменения величины относительной погрешности расчета силы тока нулевой последовательности (ΔK_0) при различных величине и характере нагрузки: 1 – регулируемая индуктивная нагрузка (дрессели); 2 – регулируемая активная нагрузка (реостаты); 3 – шина вводного распределительного щита для подключения нулевого защитного проводника (РЕ); 4 – шина вводного распределительного щита для подключения нулевого рабочего проводника (N); 5 – вводной распределительный щит; 6 – ПК (ноутбук); 7 – блок несинусоидальной нагрузки (индукционные лампы); 8 – шасси *National Instruments Compact DAQ* с измерительными модулями NI 9225 и 9227 / Fig. 1. Bench for investigation of changes in the relative error of calculation of zero-sequence asymmetry coefficient (ΔK_0), at different magnitude and character of load: 1 – adjustable inductive load (chokes); 2 – adjustable active load (rheostats); 3 – busbar of the input distribution board for connection of the zero protective conductor (PE); 4 – busbar of the input distribution board for connection of the zero working conductor (N); 5 – input distribution board; 6 – PC (laptop); 7 – non-sinusoidal load block (induction lamps); 8 – National Instruments Compact DAQ chassis with measuring modules NI 9225 and 9227

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Для оценки долевого вклада высших гармонических составляющих, генерируемых нелинейными нагрузками, в ходе проводимого исследования был использован показатель эмиссии гармонических составляющих тока – суммарный коэффициент гармонических искажений (THD_I) [19–20]

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

где I_n – значение тока n-й составляющей гармонических искажений силы тока; I_1 – значение основной гармонической составляющей силы тока.

По итогам проведенных экспериментальных исследований в работе был выполнен сравнительный анализ изменения величин относительных погрешностей расчета силы тока нулевой последовательности (ΔK_0) с использованием базового МСС [15] и модифицированного МСС с ИМЗ [18] при изменении усредненного по трем фазам $THD_{I, \text{ср}}$ и $K_{\text{нр}}$ в режиме амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке.

Объем каждой из исследуемых совокупностей величин, полученных по результатам выполненных расчетов, составил 106 значений. Среднее арифметическое значение и значение медианы для исследуемой совокупности величин, полученных с использованием базового МСС, составили 24,24 % и 21,25 %, а для совокупности величин, полученных при использовании моди-

фицированного МСС с ИМЗ – 0,16 %. Минимальное и максимальное значения для совокупности величин, полученных с использованием базового МСС, составили 0,82 % и 61,3 %, а для совокупности величин, полученных при использовании модифицированного МСС с ИМЗ, – 0,14 % и 0,2 % соответственно. Учитывая значения медианы, а также величин нижней (15,7 %) и верхней (31,3 %) квартилей для совокупности величин, полученных с использованием базового МСС, можно сделать предварительное заключение, что подавляющее большинство значений относительной погрешности при расчете $\Delta K_{0 \text{ баз. МСС}}$ не превышает 31,3 %, и лишь незначительное количество от исследуемой совокупности находится в диапазоне от 31,3 % до 61,3 %. В то же время величины нижней и верхней квартилей для совокупности величин $\Delta K_{0 \text{ мод. МСС с ИМЗ}}$ составляют 0,15 % и 0,16 % соответственно. Для большей наглядности вычисленных параметров прикладной статистики на рисунке 2 построены гистограммы распределения исследуемых совокупностей.

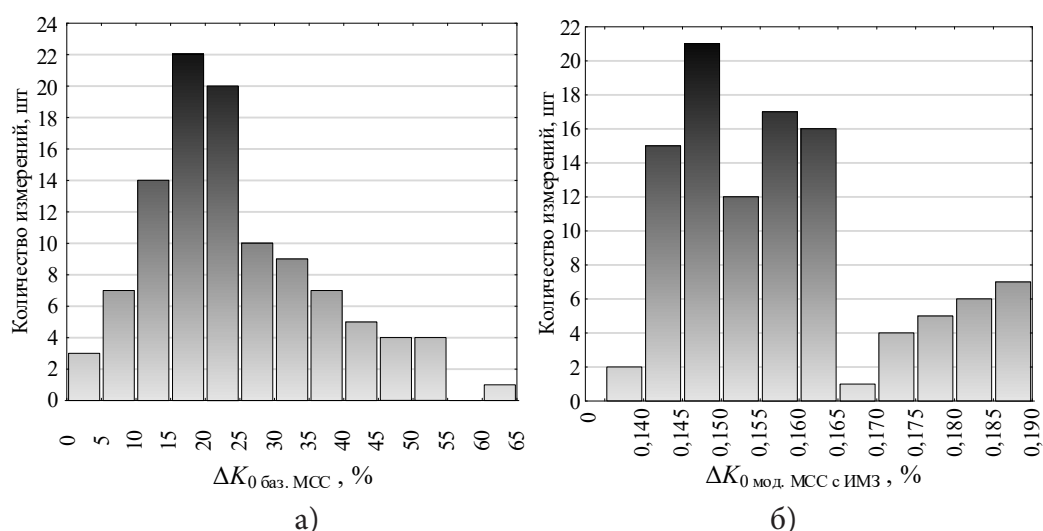


Рис. 2. Гистограммы распределения совокупностей величин ΔK_0 в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке, при их расчете по: а) – базовый МСС; б) – модифицированный МСС с ИМЗ / Fig. 2. Histograms of distribution of aggregate values of ΔK_0 in case of amplitude-phase asymmetry at active-inductive non-sinusoidal load, at their calculation according to:

а) – basic SCM; б) – modified SCM MIV

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Для количественной оценки степени связи между изменениями величин ΔK_0 , рассчитываемых с использованием базового МСС, THDI_{ср} и $K_{\text{нер}}$, был выполнен анализ коэффициентов корреляции, результаты которого приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 / Table 1

Оценка степени связи между изменением ΔK_0 , рассчитываемого с использованием базового МСС, при изменении $K_{\text{нер}}$ в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке / Estimation of the degree of coupling between the change of ΔK_0 , calculated using basic SCM, with the change of $K_{\text{нер}}$ in the case of amplitude-phase asymmetry under active-inductive non-sinusoidal loading

$\Delta K_{0 \text{ баз. МСС}}$	$K_{\text{нер}}$
1,000000	-0,635070
-0,635070	1,000000

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Коэффициент корреляции между изменениями величин относительной погрешности расчета силы тока по нулевой последовательности при изменении коэффициента неравномерности загрузки фаз, в соответствии с таблицей 1, свидетельствует о том, что между данными величинами существует значительная линейная обратная связь.

Таблица 2 / Table 2

Оценка степени связи между изменения ΔK_0 , рассчитываемого с использованием базового МСС, при изменении $THD_{l,cp}$ в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке / Estimation of the degree of coupling between the change of ΔK_0 calculated using basic SCM with the change of $THD_{l,av}$ in the case of amplitude-phase asymmetry under active-inductive non-sinusoidal load

ΔK_0 баз. МСС	$THD_{l,cp}$
1,000000	0,426639
0,426639	1,000000

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Коэффициент корреляции между изменениями величин относительной погрешности расчета силы тока нулевой последовательности при изменении усредненного по трем фазам коэффициента суммарных гармонических составляющих тока, в соответствии с таблицей 2, свидетельствует о том, что между данными величинами существует умеренная линейная прямая связь.

Для большей наглядности этих связей на рисунке 3 представлены диаграммы рассеяния исследуемых совокупностей.

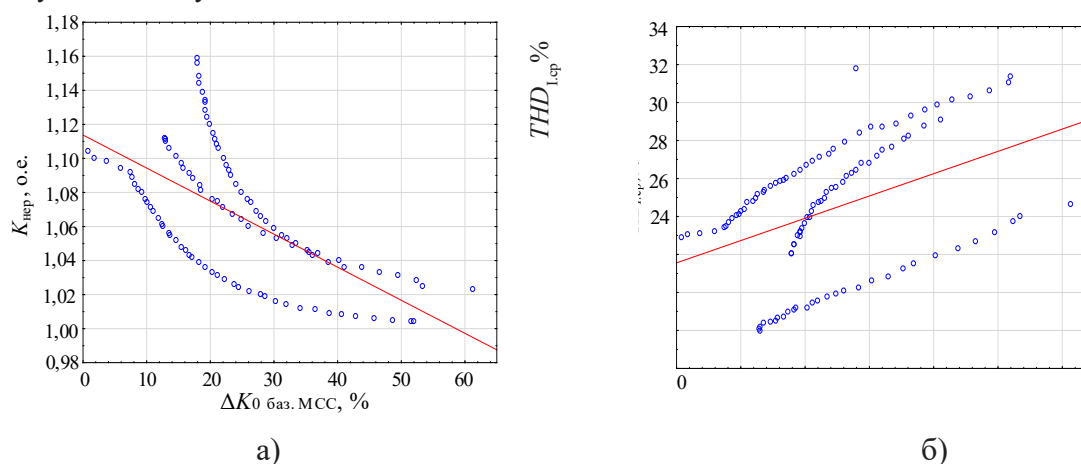


Рис. 3. Диаграммы рассеяния совокупностей величин ΔK_0 в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке, при изменении: а) – $K_{пер}$; б) – $THD_{l,av}$ / Fig. 3. Scattering diagrams of total values of ΔK_0 case of amplitude-phase asymmetry at active-inductive non-sinusoidal load, when changing: а) – K_{unbal} ; б) – $THD_{l,av}$

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

В свою очередь, результаты анализа коэффициентов корреляции при изменении $K_{пер}$, но при использовании для расчета ΔK_0 модифицированного МСС с ИМЗ, свидетельствуют о том, что между ΔK_0 мод. МСС с ИМЗ и $K_{пер}$ в исследуемом режиме существует слабая линейная прямая связь.

Однако в то же время и для той же исследуемой совокупности анализа коэффициентов корреляции при изменении $THD_{l,cp}$ и при использовании для расчета ΔK_0 мод. МСС с ИМЗ в таблице 3, свидетельствуют о том, что между ΔK_0 мод. МСС с ИМЗ и $THD_{l,cp}$ в исследуемом режиме существует тесная линейная обратная связь. Для большей наглядности этой связи на рисунке 4 представлена диаграмма рассеяния исследуемой совокупности.

Таблица 3 / Table 3

Оценка степени связи между изменениями ΔK_0 , при расчете которого использован модифицированный МСС с ИМЗ, и $THD_{I,cp}$ в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке / Estimation of the degree of coupling between changes in ΔK_0 , whose calculation uses modified SCM MIV, with changes in $THD_{I,av}$ in the case of amplitude-phase asymmetry under an active-inductive non-sinusoidal load

$\Delta K_{0 \text{ мод. МСС с ИМЗ}}$	$THD_{I,cp}$
1,000000	-0,720588
-0,720588	1,000000

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

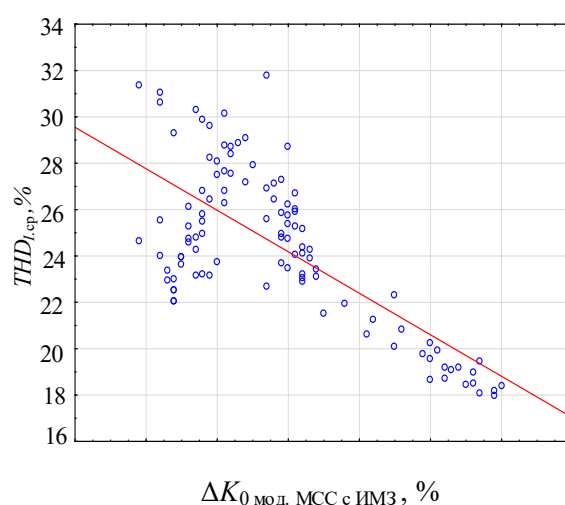


Рис. 4. Диаграмма рассеяния совокупности величин $\Delta K_{0 \text{ мод. МСС с ИМЗ}}$ в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке, при изменении усредненного по трем фазам коэффициента суммарных гармонических составляющих тока / Fig. 4. Dissipation diagram of the totality of $\Delta K_{0 \text{ мод. SCM MIV}}$ diagram value in the case of amplitude-phase asymmetry under active-inductive non-sinusoidal load, when the coefficient of total harmonic components of current averaged over three phases changes.

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Следовательно, применение модифицированного МСС с ИМЗ в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке позволяет повысить точность расчета коэффициента несимметрии силы тока по нулевой последовательности.

Закключение / Conclusion. Применение метода симметричных составляющих, реализуемого с использованием операторов поворота, для расчета величины силы тока нулевой последовательности в действующих распределительных электрических сетях сопряжено с появлением относительной погрешности ее определения, если сравнивать утроенное расчетное значение со значением силы тока, измеренным в нулевом рабочем проводнике (при использовании физической модели системы электроснабжения) в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке.

Для снижения величин приведенных погрешностей расчета силы тока нулевой последовательности рекомендуется применять метод оценки симметричных составляющих силы тока, основанный на измерении мгновенных значений силы тока синхронно по трем фазам за один период.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ханнин Ю. И., Болиев И. А. Анализ несимметрии напряжений в электрических сетях, питающих бытовых потребителей // Приоритетные научные исследования и инновационные технологии в АПК: наука – производству: материалы Национальной НПК (Волгоград, 29 октября 2019 года). Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2019. С. 459–465.
2. Юндин М. А., Пятикопов С. М., Сливин С. М. Исследование несинусоидальности и несимметрии в современных электросетях 0,38 кВ // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 278–286.
3. Наумов А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>
4. Авербух М. А., Жилин Е. В. Оценка качества электроэнергии в системе электроснабжения жилого микрорайона // Новая наука: От идеи к результату. 2015. № 5(2). С. 134–139.
5. Baghini A. Handbook of Power Quality. University of Bergamo. Wiley, 2008. P. 642.
6. De Almeida A. L., Moreira J., Delgado. Power Quality Problems and New Solutions. ISR – Department of Electrical and Computer Engineering University of Coimbra, Pólo II 3030-290. Coimbra, 2003. P. 25–33. <https://doi.org/10.24084/repqj01.004>
7. Бирюлин В. И., Куделина Д. В. Разработка модели для анализа способов снижения несимметрии напряжений в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2. С. 72–85. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>
8. Дед А. В., Паршукова А. В., Халитов Н. А. Оценка дополнительных потерь мощности от несимметрии напряжений и токов в элементах систем электроснабжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 10-3. С. 421–425.
9. Рахимов О. С., Мирзоев Д. Н., Грачева Е. И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 209–222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>
10. Ch Y., Goswami S. K., Chatterjee D. Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. Vol. 83. P. 87–95.
11. Троицкий А. И., Костинский С. С. Обобщение понятия «несимметричные нагрузки» с целью их внутреннего симметрирования по критерию снижения потерь мощности // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 126–131.
12. О программном обеспечении для планирования мероприятий по снижению потерь мощности от несимметрии токов в сетях 0,4 кВ / А. Б. Баламетов, А. К. Салимова, Н. И. Гаджиев, Э. А. Баламетов // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 328–335. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.130.328-335>
13. Троицкий А. И. О методической погрешности определения коэффициента неравномерности загрузки фаз // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2002. № 2. С. 73–75.
14. Allaev K. R., Musinova G. F. Analysis of power losses in phases in distribution networks at load imbalance // Universum. 2020. No. 6(75) P. 65–70. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75>
15. Fortescue C. L. Method of Symmetrical Coordinates // Transaction of American Institute Electrical Engineer. 1918. 1027 p.
16. Костюков Д. А. Оценка вклада потребителя в несимметрию напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2018. № 6(69). С. 24–34. <https://doi.org/dspace.ncfu.ru/handle/20.500.12258/4922>
17. Sayenko Yu. L., Kalyuzhnyi D. N., Bolgov V. A. Identification and assessment of the influence of unbalance voltage sources in three-phase three-wire electric networks // Technical Electrodynamics. 2019. Vol. 6. P. 65–73. <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.065>
18. Петров А. В., Костюков Д. А. Способ цифровой обработки трехфазного сигнала для выделения симметричных составляющих // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2022. № 3(90). С. 7–15. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2022.3.1>
19. Gosbel V. S., Browne T. J., Perera S. Harmonic Allocation Using IEC/TR 61000-3-6 at the Distribution / Transmission Interface. ICHQP/ 2008: 13th International Conference on Harmonics & Quality of Power. 2008. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2008.4668752>
20. Cadena-Zarate C., Caballero-Peña J., Osma-Pinto G. Simulation-based probabilistic-harmonic load flow for the study of DERs integration in a low-voltage distribution network // AIMS Electronics and Electrical Engineering. 2024. Vol. 8. No. 1. P. 53–70. <https://doi.org/10.3934/electreng.2024003>

REFERENCES

1. Khanin YuI, Boliev IA. Analysis of voltage asymmetry in electrical networks supplying household consumers. Priority scientific research and innovative technologies in agriculture: science for production: materials of the National NPC (Volgograd, October 29, 2019). Volgograd: Volgograd State Agrarian University; 2019. P. 459-465. (In Russ.).
2. Yundin MA, Pyatikopov SM, Slivin SM. Investigation of non-sinusoidality and asymmetry in modern 0.38 kV power grids. *Innovation. Science. Education.* 2020;(23):278-286. (In Russ.).
3. Naumov AA. Ensuring the required quality of electric energy. *Izvestia of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS.* 2020;22(1):85-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>
4. Averbukh MA, Zhilin EV. Assessment of the quality of electricity in the power supply system of a residential neighborhood. *New science: From idea to result.* 2015;5(2):134-139. (In Russ.).
5. Baggini A. Handbook of electricity quality. University of Bergamo. Wiley; 2008. P. 642.
6. De Almeida AL, Moreira H, Delgado. Problems of electricity quality and new solutions. *ISR – Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Coimbra, Pólo II, 3030-290. Coimbra;* 2003. P. 25-33. <https://doi.org/10.24084/repqj01.004>
7. Biryulin VI, Kudelina DV. Development of a model for analyzing ways to reduce voltage asymmetry in power supply systems. *News of higher educational institutions. Problems of energy.* 2022;24(2):72-85. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>
8. Ded AV, Parshukova AV, Khalitov NA. Assessment of additional power losses from asymmetry of voltages and currents in elements of power supply systems. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2015;(10-3):421-425. (In Russ.).
9. Rakhimov OS, Mirzoev DN, Gracheva EI. Experimental study of indicators of quality and loss of electricity in low-voltage rural electric networks. *Izvestia of higher educational institutions. Problematic issues.* 2021;23(3):209-222. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>
10. Ch Y, Goswami SK, Chatterjee D. The impact of network reconfiguration on the quality of electricity in the distribution system. *International Journal of Electric Power Engineering and Energy Systems.* 2016;83:87-95.
11. Troitskiy AI, Kostinsky SS. Generalization of the concept of asymmetric loads for the purpose of their internal symmetry according to the criterion of reducing power losses. *News of higher educational institutions. Electromechanics.* 2013;(1):126-131. (In Russ.).
12. Balametov AB, Salimova AK, Gadzhiev NI, Balametov EA. On software for planning measures to reduce power losses from current asymmetry in 0.4 kV networks. *Software products and systems.* 2020;33(2):328-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.130.328-335>
13. Troitskiy AI. On the methodological error in determining the coefficient of uneven loading of phases. *Izvestia of higher educational institutions. Electromechanics.* 2002;(2):73-75. (In Russ.).
14. Allaev KR, Musinova GF. Analysis of power losses by phases in distribution networks with load imbalance. *Universum.* 2020;6(75):65-70. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75>
15. Fortescue KL. Method of symmetric coordinates. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers.* 1918, 1027 p.
16. Kostyukov DA. Assessment of the consumer's contribution to the voltage asymmetry along the zero sequence at the point of common connection. *Newsletter of North-Caucasus Federal University.* 2018;6(69):24-34. (In Russ.). <https://doi.org/dspace.ncfu.ru/handle/20.500.12258/4922>
17. Saenko YuL, Kalyuzhny DN, Bolgov VA. Identification and assessment of the influence of sources of asymmetric voltage in three-phase three-wire electric networks. *Technical electrodynamics.* 2019;6:65-73. <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.065>
18. Petrov AV, Kostyukov DA. A method of digital processing of a three-phase signal for the separation of symmetrical components. *Newsletter of North-Caucasus Federal University.* 2022;3(90):7-15. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2022.3.1> (In Russ.).
19. Gosbel VS, Brown TJ, Perera S. Harmonic distribution using the IEC/TR 61000-3-6 standard on the distribution/transmission interface. *ICHQF/ 2008: The 13th International Conference on Harmonics and Power Quality.* 2008. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2008.4668752>
20. Cadena-Zarate K, Caballero-Peña H, Osmá-Pinto G. Probabilistic harmonic load flow based on modeling for the study of DERS integration into a low voltage distribution network. *AIMS Electronics and Electrical Engineering.* 2024;8(1):53-70. <https://doi.org/10.3934/electreng.2024003>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Александрович Пестерев – аспирант, ассистент кафедры электроснабжения и электропривода (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Researcher ID: KOK-2411-2024.

Сергей Сергеевич Костинский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и электропривода (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Researcher ID: ABG-7265-2020.

Нури Дазмирович Наракидзе – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных и измерительных системы и технологий (ИИСТ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Researcher ID: A-4713-2014.

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Александрович Пестерев. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

Сергей Сергеевич Костинский. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Нури Дазмирович Наракидзе. Формулирование цели исследования, сбор исходных электротехнических данных, контроль и утверждение результатов исследований. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Pesterev – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Systems and Electric Drive, South-Russian State Polytechnic University, Researcher ID: KOK-2411-2024.

Sergey S. Kostinskiy – Cand. Sci (Techn.), Associate Professor of Department of Electric Power Systems and Electric Drive, South-Russian State Polytechnic University, Researcher ID: ABG-7265-2020.

Nuri D. Narakidze – Cand. Sci (Techn.), Associate Professor of Information and Measurement Systems and Technologies, South-Russian State Polytechnic University, Researcher ID: A-4713-2014.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Aleksandr A. Pesterev. Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

Sergey S. Kostinskiy. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Nuri D. Narakidze. Formulating of the purpose of the research, collecting of initial electrical data, monitoring and approving of the research results. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.