

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317.74

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-5

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А. И. Нефедьев<sup>1</sup>, Д. И. Нефедьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> iit@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются емкостные делители высокого напряжения, применяемые в операциях поверки (калибровки) высоковольтных средств измерения, а также при необходимости расширения пределов измерения электростатических вольтметров. Предметом исследования являются способы повышения точности емкостных делителей высокого напряжения с распределенными параметрами, применяемых в указанных выше областях. Целью работы является анализ двух способов повышения точности, один из которых основан на применении новых конструктивных решений, а другой – на реализации новых теоретических положений, обеспечивающих возможность повышения точности емкостных делителей высокого напряжения в широком диапазоне величин. *Материалы и методы.* Анализ двух способов повышения точности емкостных делителей высокого напряжения выполнен на основе положений теоретической метрологии, элементов математической статистики и математического моделирования, а также экспериментального исследования предложенных в работе способов повышения точности измерения. *Результаты.* Разработаны два способа повышения точностных характеристик емкостных делителей высокого напряжения. Первый способ основан на применении новых конструктивных решений для минимизации погрешности емкостных делителей высокого напряжения. Второй способ реализует новые теоретические положения, реализация которых позволяет существенно снизить погрешность емкостных делителей высокого напряжения в процессе эксплуатации. *Выводы.* Предложенная новая конструкция экранов конденсатора основной (измерительной) цепи емкостного делителя высокого напряжения и использование сочетания двух независимых друг от друга методов – метода независимой поверки (самокалибровки) и метода измерения коэффициента преобразования делителя с применением переходного воздушного конденсатора обеспечивают высокую точность измерения коэффициентов преобразования емкостных делителей высокого напряжения. Это позволит повысить как точность коммерческого учета электроэнергии, так и обеспечить децентрализованное воспроизведение и передачу относительной величины – коэффициента преобразования емкостного делителя высокого напряжения.

**Ключевые слова:** емкостной делитель высокого напряжения, независимая поверка, воздушный конденсатор, коэффициент преобразования

**Для цитирования:** Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И. Повышение точности емкостных делителей высокого напряжения // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 39–45. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-5

## INCREASING THE ACCURACY OF HIGH VOLTAGE CAPACITIVE DIVIDERS

A.I. Nefed'ev<sup>1</sup>, D.I. Nefed'ev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

<sup>2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> iit@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The object of the study is high-voltage capacitive dividers used in the verification (calibration) operations of high-voltage measuring instruments, as well as, if necessary, expanding the measurement limits of electrostatic voltmeters. The subject of the study is ways to improve the accuracy of high-voltage capacitive dividers with distributed parameters applied in the above areas. The aim of the work is to analyze two ways to increase accuracy, one of which is based on the application of new design solutions, and the other on the implementation of new theoretical provisions that ensure the possibility of increasing the accuracy of high-voltage capacitive dividers in a wide range of values. *Materials and methods.* The analysis of two ways to increase the accuracy of capacitive dividers of high voltage is carried out on the basis of the provisions of theoretical metrology, elements of mathematical statistics and mathematical modeling, as well as an experimental study of the methods proposed in the work to increase the accuracy of measurement. *Results.* Two methods have been developed to improve the accuracy characteristics of high-voltage em-bone dividers. The first method is based on the use of new design solutions to minimize the error of high-voltage capacitive dividers. The second method implements new theoretical provisions, the implementation of which makes it possible to significantly reduce the error of high-voltage capacitive dividers during operation. *Conclusions.* The proposed new design of the capacitor screens of the main (measuring) circuit of the high-voltage capacitive divider and the use of a combination of two independent methods – the method of independent verification (self-calibration), and the method of measuring the conversion coefficient of the divider using a transient air capacitor ensure high accuracy of measuring the conversion coefficients of high-voltage capacitive dividers. This will improve both the accuracy of commercial electricity metering and ensure decentralized reproduction and transmission of a relative value – the conversion coefficient of a high-voltage capacitive divider.

**Keywords:** high-voltage voltage divider, independent verification, air capacitor, conversion factor

**For citation:** Nefed'ev A.I., Nefed'ev D.I. Increasing the accuracy of high voltage capacitive dividers. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):39–45. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-5

Одной из актуальных проблем измерений в области высоковольтной энергетики является повышение точности измерения переменного напряжения, что обусловлено непрерывно возрастающими требованиями к повышению точности измерений. В области измерения высоких напряжений эта проблема остается актуальной и в настоящее время [1].

Для точных измерений высоких напряжений часто используются емкостные делители высокого напряжения (ЕДВН). Основной проблемой известных ЕДВН является существенно большая погрешность по сравнению с индуктивными делителями напряжения и измерительными трансформаторами [2–4].

Проблема повышения точности ЕДВН может быть решена двумя способами.

Первый способ повышения точности ЕДВН заключается в разработке новой конструкции его элементов [5]. Конструкция экранированного конденсатора измерительной цепи ЕДВН приведена на рис. 1.

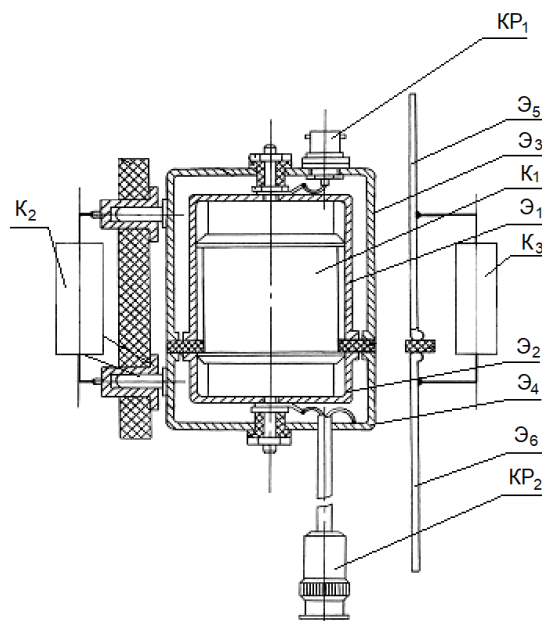


Рис. 1. Конденсатор измерительной цепи ЕДВН

Измерительная цепь ЕДВН состоит из цилиндрических конденсаторов  $K_1$ , каждый из которых находится в металлических экранах  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , каждый из которых соединен с выводами конденсатора и электрически разделены изолирующим кольцом. Снаружи конденсатора находятся экраны  $\mathcal{E}_3$  и  $\mathcal{E}_4$ .

Конденсаторы измерительной цепи ЕДВН соединены с помощью разъемов  $KP_1$  и  $KP_2$ . К первой эквипотенциальной цепи ЕДВН относятся конденсаторы  $K_2$ . Вторая эквипотенциальная цепь состоит из плоских экранов  $\mathcal{E}_5$  и  $\mathcal{E}_6$ , закрепленных на кожухе делителя, а их потенциал равен потенциалу обкладок конденсатора  $K_3$  [6].

Постоянство коэффициента деления ЕДВН определяется стабильностью конденсаторов его измерительной цепи. Экспериментально установлено, что в ЕДВН необходимо использовать конденсаторы с зависимостью емкости от приложенного напряжения не выше  $\pm 0,003\%$  в диапазоне напряжений до 500 В. В экспериментальной конструкции ЕДВН были использованы газонаполненные конденсаторы ФГТ-И емкостью 0,1 мкФ на напряжение 1000 В.

Для повышения точности ЕДВН было проведено сравнение емкостей конденсаторов первой эквипотенциальной цепи и измерительной цепи мостовым методом. Емкости конденсаторов указанных цепей не должны отличаться более чем на  $\pm 0,1\%$ .

Измерение напряжений на конденсаторах измерительной цепи и второй эквипотенциальной цепи ЕДВН производилось электростатическим вольтметром. При отличии значений емкостей конденсаторов измерительной и второй эквипотенциальной цепей ЕДВН производился подбор значений емкости конденсаторов второй эквипотенциальной цепи [7].

Второй способ повышения точности ЕДВН заключается в применении устройства, обеспечивающего повышение точности измерения коэффициента преобразования ЕДВН на месте их эксплуатации [7].

Разработанный метод поверки (калибровки) ЕДВН основан на сочетании двух независимых методов – метода независимой поверки (самокалибровки) и разработанного метода с применением воздушного конденсатора [8].

На рис. 2 приведено схематическое изображение устройства для измерения коэффициента преобразования ЕДВН.

Устройство состоит из источника напряжения ИН (рис. 2), компаратора тока КТ, который образован однодекадной обмоткой  $L_1$ , шестидекадной обмоткой  $L_2$ , квадратурной обмоткой  $L_3$ , индикаторной обмоткой  $L_4$ , нулевого индикатора НИ, переходного воздушного конденсатора  $C_B$ , переменного конденсатора  $C_{\Pi}$  и емкостного делителя высокого напряжения ЕДВН. Конденсатор  $C_1$  является выходным и опорным ЕДВН, а конденсатор  $C_2$  представляет собой магазин конденсаторов, емкость каждого из которых номинально равна емкости конденсатора  $C_1$ .

Первым методом измерения коэффициента преобразования емкостного делителя напряжения является использование переходного воздушного конденсатора без нормированной погрешности, с емкостью

$$C_B = \sqrt{N_{\text{ЕДВН}}} \cdot C_{\text{вых}}.$$

Измерение коэффициента преобразования ЕДВН производится за два этапа.

Сначала переключатель  $S_4$  установлен в положение 1, при этом определяется коэффициент преобразования  $N_{C_B}$  воздушного конденсатора по отношению к коэффициенту преобразования  $N_{C_{\text{вых}}} = 1$ .

Условие равновесия двух параллельных цепей:

$$C_B \rho_1 = C_{\text{вых}} \mu_1, \quad (1)$$

где  $\mu_1$  – отсчет по плечу  $L_1$ ;  $\rho_1$  – соответственно, отсчет по плечу  $L_2$  компаратора тока КТ.

Заменив в равенстве (1)  $C_{\text{вых}}$  и  $C_B$  соответственно на коэффициент преобразования  $N_{C_{\text{вых}}}$  и  $N_{C_B}$ , получим

$$N_{C_{\text{вых}}} \rho_1 = N_{C_B} \mu_1.$$

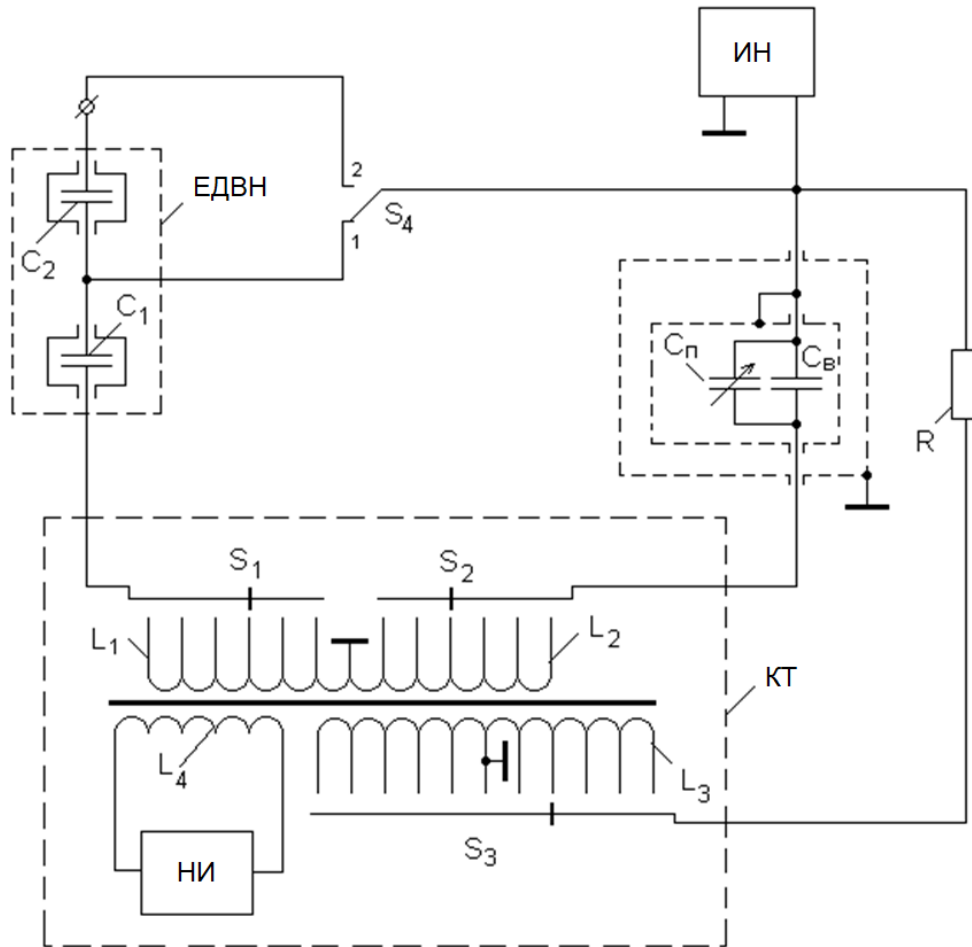


Рис. 2. Устройство для измерения коэффициента преобразования ЕДВН

Находим коэффициент преобразования  $N_{Cв}$ :

$$N_{Cв} = \frac{N_{Cвых} \mu_1}{\rho_1}.$$

При  $N_{Cвых} = 1$  получим

$$N_{Cв} = \frac{\mu_1}{\rho_1}.$$

Далее определим  $N_{ЕДВН}$  (переключатель  $S_4$  находится в положении 2). В этом случае условие равновесия схемы

$$N_{ЕДВН} \mu_2 = N_{Cв} \rho_2 = \mu_1 \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

где  $\mu_2$  – отсчет по плечу  $L_1$ ;  $\rho_2$  – соответственно отсчет по плечу  $L_2$  компаратора тока КТ.

Коэффициент преобразования  $N_{ЕДВН}$ :

$$N_{ЕДВН} = \frac{\mu_1 \rho_2}{\mu_2 \rho_1}.$$

Коэффициент преобразования  $K_{ЕДВН}$  равен

$$K_{ЕДВН} = \frac{1}{N_{C_{ЕДВН}}}. \quad (2)$$

Коэффициент преобразования  $K_{\text{ЕДВН}}$  был получен при условии отсутствия влияния приложенного напряжения на емкость воздушного конденсатора.

Погрешность разработанного метода измерения коэффициентов преобразования ЕДВН обусловлена следующими составляющими [8]:

– погрешностью компаратора тока  $\gamma_{\text{КТ}} = 0,001 \%$  (определена методом независимой поверки);

– погрешностью, вносимой зависимостью емкости конденсаторов ФГТ-И от приложенного напряжения:  $\gamma_{\Delta U} = 0,002 \%$ ;

– временной нестабильностью коэффициента преобразования ЕДВН:  $\gamma_{\text{ВН}} = 0,005 \%$  (за шесть месяцев, определена экспериментально);

– температурной нестабильностью ЕДВН в диапазоне 10–35 °С:  $\gamma_{\text{ТН}} = 0,005 \%$ .

Принимая составляющие погрешности коэффициента преобразования ЕДВН и компаратора тока КТ в пределах допуска равновероятными, определим доверительную погрешность ЕДВН при доверительной вероятности 0,99:

$$\gamma_{\text{ЕДВН}} = 1,4\sqrt{\gamma_{\text{КТ}}^2 + \gamma_{\Delta U}^2 + \gamma_{\text{ВН}}^2 + \gamma_{\text{ТН}}^2} = 0,01 \%$$

Вторым методом повышения точности измерения коэффициента преобразования ЕДВН является метод независимой поверки [8].

Измерение коэффициента преобразования  $K_{\text{UC}}$  ЕДВН методом независимой поверки производится в два этапа. На первом этапе (переключатель  $S_4$  – в положении 1) производится балансировка плеч компаратора тока КТ с помощью переменного конденсатора  $C_{\text{П}}$ . При этом на плечах  $L_1$  и  $L_2$  выставляются отсчеты, равные единице.

На втором этапе поочередно производятся относительные измерения всех емкостей конденсаторов, входящих в ЕДВН, относительно конденсатора  $C_1$ , который является опорным. Коэффициент преобразования  $K_{\text{UC}}$  составного ЕДВН равен отношению суммы реактивных сопротивлений емкостей всех конденсаторов  $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$ , входящих в состав ЕДВН, к реактивному сопротивлению  $Z_1$  емкости выходного конденсатора ЕДВН:

$$K_{\text{UC}} = \frac{Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n}{Z_1}, \quad (3)$$

где  $Z_1 = 1 / \omega C_1$ ;  $Z_2 = 1 / \omega C_2 \dots Z_n = 1 / \omega C_n$ .

Подставляя полученные сопротивления в формулу (3), получим

$$K_{\text{UC}} = \frac{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} + \dots + \frac{1}{\omega C_n}}{\frac{1}{\omega C_1}} = \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}{\frac{1}{C_1}}.$$

Емкость  $C_1$  является опорной для ЕДВН. Выразим  $C_1 \dots C_n$  через  $C_1$  и отсчеты  $\rho_1 \dots \rho_n$  по показаниям плеча  $L_2$  компаратора тока.

Коэффициент деления ЕДВН определяется по формуле

$$K_{\text{UC}} = 1 + \frac{1}{\rho_2} + \dots + \frac{1}{\rho_n}. \quad (4)$$

При использовании метода независимой поверки напряжение на обкладках конденсатора и на его экране является одинаковым, поэтому утечки тока с конденсатора исключены, измерения проводятся при рабочем напряжении на конденсаторах, что и обеспечивает высокую точность метода.

Погрешность метода независимой поверки коэффициента преобразования ЕДВН обусловлена следующими составляющими [8]:

– погрешностью компаратора тока  $\gamma_{\text{КТ}} = 0,001 \%$  (определена методом независимой поверки);

– погрешностью, вносимой зависимостью емкости конденсаторов ФГТ-И от приложенного напряжения:  $\gamma_{\Delta U} = 0,002 \%$  (определена экспериментально);

- температурной нестабильностью ЕДВН в диапазоне 10 – 35 °С:  $\gamma_{ТН} = 0,005 \%$ ;
- погрешностью, обусловленной порогом чувствительности нулевого индикатора  $\Theta_{НИ} = 0,0001 \%$ .

Считая составляющие погрешности коэффициента преобразования ЕДВН и компаратора тока КТ в пределах допуска равновероятными, определим доверительную погрешность ЕДВН при доверительной вероятности 0,99:

$$\gamma_{UC} = 1,4\sqrt{\gamma_{КТ}^2 + \gamma_{\Delta U}^2 + \gamma_{ТН}^2 + \Theta_{НИ}^2} = 0,0077 \%$$

Совпадение результатов измерения коэффициентов преобразования ЕДВН, определенных на основе метода переходного воздушного конденсатора и метода независимой поверки, свидетельствует как об отсутствии утечек тока с конденсаторов измерительной цепи, так и о компенсации всех погрешностей ЕДВН. При различии результатов измерения коэффициентов преобразования ЕДВН, определенных на основе метода переходного воздушного и метода независимой поверки, необходимо изменить емкости экранирующих цепей таким образом, чтобы указанные коэффициенты преобразования были равны.

Таким образом, предложенная конструкция конденсатора ЕДВН и использование сочетания двух независимых друг от друга методов – метода независимой поверки (самоповерки), и метода с применением переходного воздушного конденсатора – обеспечивают высокую точность измерения коэффициентов преобразования ЕДВН, что позволит повысить как точность коммерческого учета электроэнергии, так и обеспечить децентрализованное воспроизведение и передачу относительной величины – коэффициента преобразования ЕДВН.

#### Список литературы

1. Булыгин Ф. В. Основные задачи «Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года»: взгляд разработчика // Главный метролог. 2017. № 5. С. 46–53.
2. Roman H., Vaclav K., Mikołaj B. [et al.]. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor // *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2020. № 26. P. 25–31.
3. Dianqi G. New Structure of Potential Optimization in Capacitive Voltage Divider // *High Voltage Apparatus*. 2018. № 54. P. 76–79.
4. Электронный образцовый делитель напряжения. URL: [http://macdem.ru/images/Tettex/Brochure\\_Tettex\\_ru/4860.pdf](http://macdem.ru/images/Tettex/Brochure_Tettex_ru/4860.pdf) (дата обращения: 14.04.2022).
5. Ломтев Е. А., Нефедьев Д. И. Принципы построения и конструкции высоковольтных емкостных делителей напряжения // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2014. № 4. С. 4–8.
6. Нефедьев А. И. Емкостный делитель высокого напряжения // *Электрика*. 2013. № 2. С. 32–34.
7. Нефедьев А. И. Независимая поверка высоковольтных составных емкостных делителей напряжения // *Приборы*. 2012. № 6. С. 49–52.
8. Нефедьев А. И. Методы и средства повышения точности высоковольтных составных емкостных делителей напряжения // *Приборы*. 2010. № 11. С. 49–52.

#### References

1. Bulygin F.V. The main tasks of the "Strategy for ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation until 2025": developer's view. *Glavnyy metrolog = Chief Metrologist*. 2017;(5):46–53. (In Russ.)
2. Roman H., Vaclav K., Mikołaj B. [et al.]. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering*. 2020;(26):25–31.
3. Dianqi G. New Structure of Potential Optimization in Capacitive Voltage Divider. *High Voltage Apparatus*. 2018;(54):76–79.
4. *Elektronnyy obraztsovyy delitel' napryazheniya = Electronic model voltage divider*. (In Russ.). Available at: [http://macdem.ru/images/Tettex/Brochure\\_Tettex\\_ru/4860.pdf](http://macdem.ru/images/Tettex/Brochure_Tettex_ru/4860.pdf) (accessed 14.04.2022).
5. Lomtev E.A., Nefed'ev D.I. Principles of construction and construction of high-voltage capacitive voltage dividers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;(4):4–8. (In Russ.)
6. Nefed'ev A.I. High voltage capacitive divider. *Elektrika = Electrician*. 2013;(2):32–34. (In Russ.)
7. Nefed'ev A.I. Independent verification of high-voltage composite capacitive voltage dividers. *Pribory = Devices*. 2012;(6):49–52. (In Russ.)

8. Nefed'ev A.I. Methods and means of improving the accuracy of high-voltage composite capacitive voltage dividers. *Pribory = Devices*. 2010;(11):49–52. (In Russ.)

***Информация об авторах / Information about the authors***

**Алексей Иванович Нефедьев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры электротехники,  
Волгоградский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28)  
E-mail: iit@pnzgu.ru

**Aleksey I. Nefed'ev**

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department of electrical engi-  
neering,  
Volgograd State Technical University  
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

**Дмитрий Иванович Нефедьев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: iit@pnzgu.ru

**Dmitriy I. Nefed'ev**

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department of information  
and measurement technology and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 21.03.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2022**

**Принята к публикации/Accepted 15.05.2022**