

УДК 531.714.75

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-7

## НЕЗАВИСИМАЯ ПОВЕРКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПАРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

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

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

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

<sup>1</sup>nefediev@rambler.ru, <sup>2</sup>ndi200106@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Для метрологических исследований актуальной проблемой является децентрализованная система поверки на основе использования самоверяемых автономных средств измерений. Таким образом, актуальной задачей является разработка автономно поверяемых термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения. *Проблема и решение.* Повышение точности измерения напряжения с помощью термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения сдерживает частотная погрешность добавочных резисторов. Особенно сильно это проявляется на высоких напряжениях. Для решения этой задачи были разработаны термоэлектрические компарирующие преобразователи напряжения на 500 и 1000 В, содержащие добавочные резисторы с тремя экранами, диаметр которых определен расчетным путем. *Результаты.* Разработаны добавочные резисторы с тремя экранами, доработана методика регулирования токов на входе и выходе добавочных резисторов путем изменения сопротивления экранных резисторов, разработана методика экспериментального определения погрешности компарирования преобразователей на 500 и 1000 В, что позволило существенно уменьшить частотную погрешность. *Выводы.* Таким образом, устройство для поверки ТЭКПН обеспечивает повышение точности определения и компенсации частотной погрешности добавочного резистора в широком частотном диапазоне, что приводит к повышению точности измерения напряжения с применением ТЭКПН в широком диапазоне измеряемых величин и частот.

**Ключевые слова:** добавочный резистор, термоэлектрический преобразователь напряжения, частотная погрешность, независимая поверка

**Для цитирования:** Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И. Независимая поверка термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 58–63. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-7

## INDEPENDENT VERIFICATION OF THERMOELECTRIC COMPARING VOLTAGE CONVERTERS

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</sup>nefediev@rambler.ru, <sup>2</sup>ndi200106@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* For metrological research, an urgent problem is a decentralized verification system based on the use of self-verified autonomous measuring instruments. Thus, an urgent task is the development of autonomously verified thermoelectric comparative voltage converters (TECVC). *Problem and solution.* Increasing the accuracy of voltage measurement using thermoelectric comparative voltage converters restrains the frequency error of the additional resistors. This is especially evident at high voltages. To solve this problem, thermoelectric comparative voltage converters for 500V and 1000V were developed, containing additional resistors with three screens, the diameter of which was determined by calculation. *Results.* Additional resistors with three screens have been developed, the method for regulating the currents at the input and output of additional resistors by changing the resistance of the screen resistors has been improved, a method has been developed for the experimental determination of the comparison error of converters for 500 and 1000V, which has significantly reduced the frequency error. *Conclusions.* Thus, the device for checking TECVC provides an increase in the accuracy of determining and compensating the frequency error of the additional resistor in a wide frequency range, which leads to an increase in the accuracy of voltage measurement using TECVC in a wide range of measured values and frequencies.

© Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Keywords:** series resistor, thermoelectric voltage converter, frequency error, independent verification

**For citation:** Nefed'ev A.I., Nefed'ev D.I. Independent verification of thermoelectric comparing voltage converters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:58–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-7

Для метрологических исследований как ранее, так и в настоящее время актуальной проблемой является децентрализованная система поверки на основе использования самоверяемых автономных средств измерений [1]. Считается, что централизованная система поверки не всегда является экономически целесообразной [2]. Таким образом, актуальной задачей является разработка автономно поверяемых термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения.

Для решения этой задачи были разработаны термоэлектрические компарирующие преобразователи напряжения на 500 и 1000 В и аттестованы по эталонным преобразователям НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в частотном диапазоне 10–100 000 Гц в качестве эталонных средств измерения 1-го разряда [3]. Несмотря на полученные результаты, проблема повышения точности автономно поверяемых термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения (ТЭКПН) на 500 и 1000 В в настоящее время все еще остается актуальной.

Наиболее простая конструкция ТЭКПН содержит резистор цилиндрической формы (рис. 1), коаксиально закрепленный в латунном корпусе и соединенный последовательно с термопреобразователем [3].

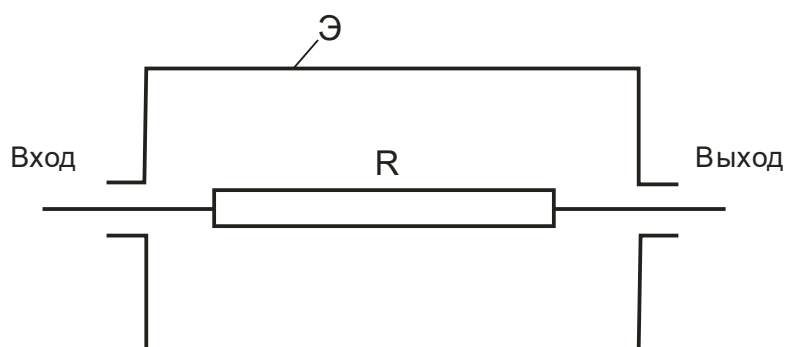


Рис. 1. Коаксиальный добавочный резистор на напряжение до 50 В

Для снижения частотной погрешности ТЭКПН применяются добавочные резисторы с двойными экранами (рис. 2), что снижает частотную погрешность в 16 раз.

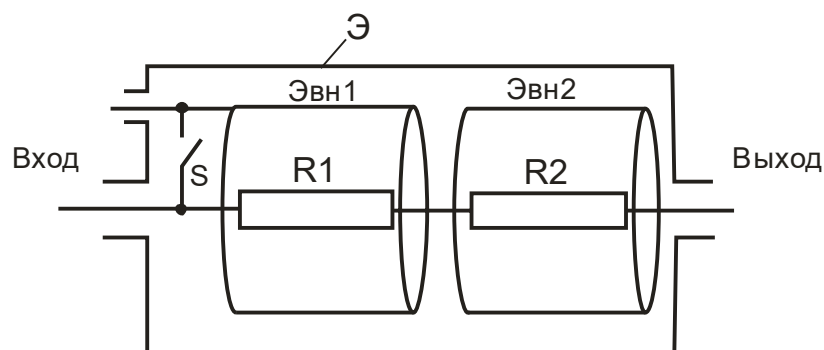


Рис. 2. Коаксиальный добавочный резистор с двойными экранами

Добавочный резистор с двойными экранами состоит из двух одинаковых последовательно соединенных частей, которые можно рассматривать как линии с распределенными параметрами, и предназначен для измерения переменного напряжения до 200 В.

Если сопротивление нагревателя ТЭКПН намного меньше сопротивления добавочного резистора, то реактивное сопротивление линий передачи:

$$|Z_{\text{вх}}| = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \cdot \text{th}\sqrt{Z \cdot Y}, \quad (1)$$

где  $Z = R + j\omega L$  – полное сопротивление добавочного резистора;  $Y = j\omega C$  – проводимость, обусловленная наличием шунтирующей емкости линии;  $R$  – активное сопротивление добавочного резистора;  $L$  – индуктивность добавочного резистора;  $C$  – шунтирующая емкость линии;  $\omega$  – круговая частота.

Модуль входного сопротивления  $|Z_{\text{вх}}|$ :

$$|Z_{\text{вх}}| = R \left( 1 + \frac{\omega^2 R^2 C^2}{180} + \frac{\omega^2 L^2}{2R^2} - \frac{\omega^2 CL}{6} \right). \quad (2)$$

Частотная погрешность преобразователя:

$$\gamma_f = \frac{\omega^2 R^2 C^2}{2} \left( \frac{L^2}{4RC^2} - \frac{L}{3R^2 C} + \frac{1}{90} \right). \quad (3)$$

Рассчитаем значение емкости и индуктивности через геометрические параметры коаксиальной линии:

$$C = \frac{0,24 \cdot 10^{-10} \epsilon l}{\lg\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (4)$$

$$L = 4,6 \mu 10^{-7} l \lg \frac{D}{d}, \quad (5)$$

где  $D$  – внутренний диаметр внешнего цилиндрического экрана;  $l$  и  $d$  – длина и диаметр добавочного резистора;  $\mu$  и  $\epsilon$  – магнитная и диэлектрическая проницаемость окружающей среды соответственно.

В экспериментальной конструкции ТЭКПН для уменьшения индуктивности добавочный резистор был сделан из нескольких резисторов типа С2-10, не имеющих спиральной нарезки и соединенных последовательно с помощью пайки.

В ТЭКПН на 500 и 1000 В имеются добавочные резисторы с двойными экранами. При этом диаметр экранов определен экспериментально путем сравнения показаний разработанных преобразователей и электростатического компаратора напряжения одновременного сравнения на 100 – 1000 В [4–7].

Поиски решения задачи повышения точности ТЭКПН на 500 и 1000 В привели к созданию добавочных резисторов с тремя экранами (рис. 3).

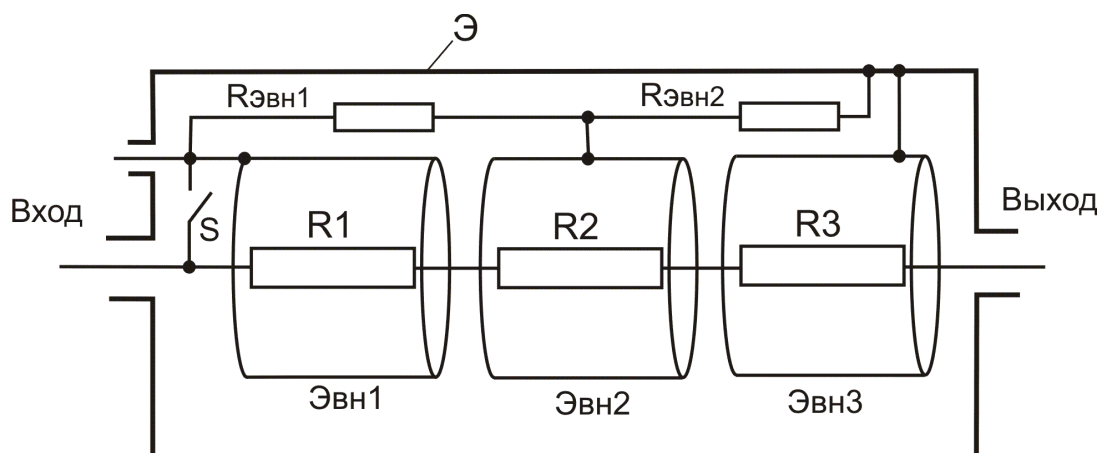


Рис. 3. Коаксиальный добавочный резистор на напряжение 500–1000 В

ТЭКПН с тремя экранами можно рассматривать как три последовательно соединенных участка коаксиальной линии:

$$Z'_{\text{вх}} = 3Z_{\text{вх}}, \quad (7)$$

где  $Z'_{\text{вх}}$  – полный импеданс преобразователя;  $Z_{\text{вх}}$  – импеданс участка, состоящего из одного резистора и экрана.

ТЭКПН с тремя экранами, по сравнению с преобразователем, выполненным с одним экраном, имеет в 81 раз меньшее расчетное значение частотной погрешности.

На рис. 4 схематически представлено устройство для независимой поверки ТЭКПН.

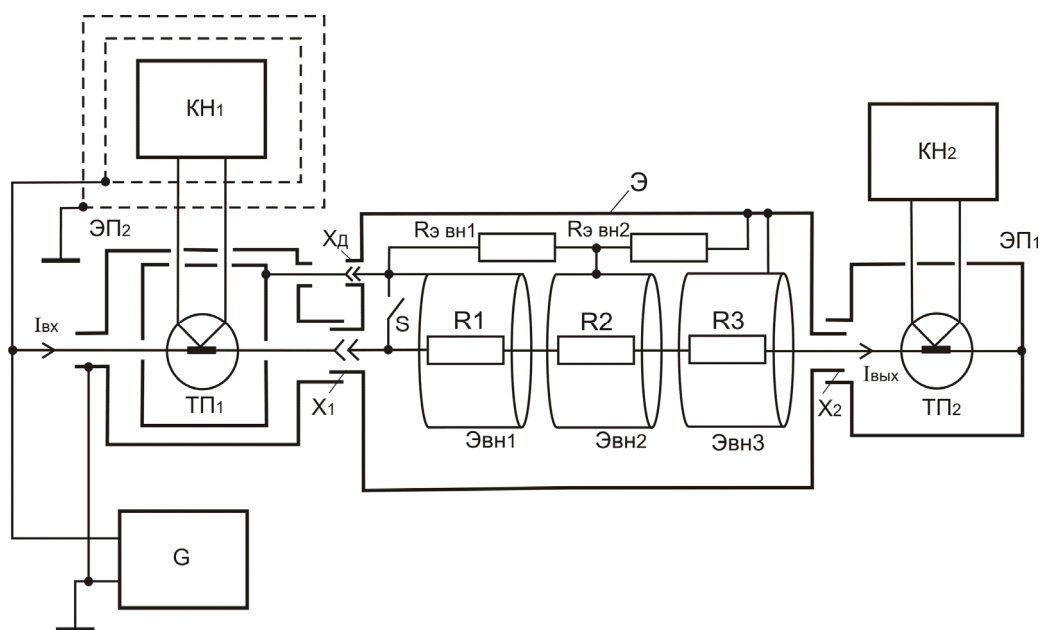


Рис. 4. Устройство для независимой поверки ТЭКПН

Устройство для независимой поверки содержит эталонный измеритель тока  $\mathcal{E}П_1$ , источник напряжения  $G$ , коаксиальный добавочный резистор (три последовательно включенные резисторы  $R_1 - R_3$  с экранами), эталонный измеритель тока  $\mathcal{E}П_2$ , компенсаторы напряжения  $КН_1$  и  $КН_2$  разъемы  $X_1$  и  $X_2$ .

Эталонный измеритель тока  $\mathcal{E}П_1$  и компенсатор напряжения  $КН_1$  выполнены с двойным экранированием. При этом наружные экраны заземлены, а внутренние экраны подключены к высокому потенциалу источника напряжения  $G$  для предотвращения утечек тока с термопреобразователя  $ТП_1$ . Введение выключателя  $S$  в коаксиальный добавочный резистор предотвращает утечку тока со входа добавочного резистора через экраны  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$  и компенсирует погрешность резисторов  $R_1 - R_3$  от утечки тока, обусловленной емкостью между резисторами  $R_1 - R_3$  и экранами  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$ .

Термопара термопреобразователя  $ТП_2$  эталонного измерителя тока  $\mathcal{E}П_2$  подключена к компенсатору напряжения  $КН_2$ , в качестве которого использован потенциометр постоянного тока РЗ63/1. Неравенство тока ( $I_{\text{вх}}$ ) на входе добавочного резистора и на его выходе ( $I_{\text{вых}}$ ) при увеличении частоты из-за неполной компенсации индуктивности резисторов  $R_1 - R_3$  и емкости экранов  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$  устраняется путем изменения сопротивления резисторов  $R_{\mathcal{E}ВН1}$  и  $R_{\mathcal{E}ВН2}$ .

В ТЭКПН с тремя экранами использованы добавочные резисторы и термопреобразователи типа ТВБ-3. Выполнение условия равенства входного и выходного токов на переменном напряжении на низкой и высокой частоте свидетельствует о полном устранении или минимизации частотной погрешности.

Погрешность ТЭКПН определялась экспериментально по методике [8] с применением в качестве эталонного средства измерений электростатического компаратора напряжения с погрешностью компарирования не более 0,001 % [4–7].

Погрешности ТЭКПН с тремя экранами на разных частотах приведены в табл. 1.

Погрешность ТЭКПН с тремя экранами

Номинальное напряжение, В	Погрешность $\delta \cdot 10^{-5}$				
	10 Гц	$10^2$ Гц	$10^3$ Гц	$10^4$ Гц	$10^5$ Гц
500	-3	+2	-1	+3	-2
1000	-3	-4	-2	-3	-5

Таким образом, устройство для поверки ТЭКПН обеспечивает повышение точности определения и компенсации частотной погрешности добавочного резистора в широком частотном диапазоне, что приводит к повышению точности измерения напряжения с применением ТЭКПН в широком диапазоне измеряемых величин и частот.

Для повышения точности компарирования ТЭКПН на 500 и 1000 В были разработаны добавочные резисторы с тремя экранами, диаметр которых определен расчетным путем, доработана методика регулирования токов на входе и выходе добавочных резисторов путем изменения сопротивления экранных резисторов, приведены результаты экспериментального определения погрешности компарирования преобразователей на 500 и 1000 В с применением в качестве эталонного средства измерений электростатического компаратора напряжения.

#### Список литературы

1. Павлов И. В. Современные требования к обеспечению единства измерений // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 7. С. 7–10.
2. Конюхов А. Г. Метрологическое обеспечение в приборостроении. Аспекты управления. М. : Изд-во стандартов, 1990. С. 40.
3. АС СССР №1331274, МПК G01R 35/00. Устройство для поверки термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения / Нефедьев И. А. Опубл. 07.04.1991, Бюл. № 13.
4. Патент РФ № 2076328, МПК G 01 R 17/08. Электростатический компаратор напряжения / Нефедьев А. И. Опубл. 27.03.1997, Бюл. № 9.
5. Nefed'ev A. I., Nefed'eva E. E. Accurate AC/DC voltage measurements using electrostatic comparator // Journal of Electrostatics. 2016. Vol. 82. С. 17–21.
6. Нефедьев А. И. Электростатический компаратор напряжения // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 51–55.
7. Nefed'ev A. I., Kravchenko S. New principle for exact DC/AC electrostatic comparators // Measurement Techniques. 2000. Vol. 43, № 4. P. 368–373.
8. ГОСТ 13384-93. Преобразователи измерительные для термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. Минск : Изд-во стандартов, 1996.

#### References

1. Pavlov I.V. Modern requirements for ensuring the uniformity of measurements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2011;54(7):7–10. (In Russ.)
2. Konyukhov A.G. *Metrologicheskoe obespechenie v priborostroenii. Aspekty upravleniya = Metrological support in instrument engineering. Management aspects*. Moscow: Izd-vo standartov, 1990:40. (In Russ.)
3. AS SSSR №1331274, MPK G01R 35/00. *Ustroystvo dlya poverki termoelektricheskikh kompariruyushchikh preobrazovateley napryazheniya = Device for checking thermoelectric comparing voltage converters*. Nefed'ev I. A. Publ. 07.04.1991, bull. № 13. (In Russ.)
4. Patent № 2076328 Russian Federation, MPK G 01 R 17/08. *Elektrostaticheskii komparator napryazheniya = Electrostatic voltage comparator*. Nefed'ev A. I. Publ. 27.03.1997, bull. no. 9. (In Russ.)
5. Nefed'ev A.I., Nefed'eva E.E. Accurate AC/DC voltage measurements using electrostatic comparator. *Journal of Electrostatics*. 2016;82:17–21.
6. Nefed'ev A.I. Electrostatic voltage comparator. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2009;6:51–55. (In Russ.)
7. Nefed'ev A.I., Kravchenko S. New principle for exact DC/AC electrostatic comparators. *Measurement Techniques*. 2000;43(4):368–373.
8. GOST 13384-93. *Preobrazovateli izmeritel'nye dlya termoelektricheskikh preobrazovateley i termopreobrazovateley soprotivleniya. Obshchie tekhnicheskije trebovaniya i metody ispytaniy = Measuring converters for thermoelectric converters and thermal resistance converters. General technical requirements and test methods*. Minsk: Izd-vo standartov, 1996. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Алексей Иванович Нефедьев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры электротехники,  
Волгоградский государственный технический  
университет  
(Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28)  
E-mail: nefediev@rambler.ru

**Aleksey I. Nefed'ev**

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of sub-department of electrical engineering,  
Volgograd State Technical University  
(28 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: ndi200106@yandex.ru

**Dmitriy I. Nefed'ev**

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