

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-1-31-38

Прототип высокоточного измерительного преобразователя переменного напряжения

О.В. Дворников¹, В.Н. Бахур¹, А.Г. Бахир¹, В.М. Лозовский¹, В.А. Чеховский²

¹Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская, 11, г. Минск 220006, Беларусь

Поступила 18.11.2025

Принята к печати 12.01.2026

Оценка уровня электрических сигналов различной формы, таких как синусоидальные или прямоугольные, последовательности импульсов, случайные и др., чаще всего проводится по среднеквадратическому значению напряжения и коэффициенту амплитуды. Проведённый анализ позволил установить отсутствие серийно выпускаемых отечественных высокоточных измерительных преобразователей переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения, предназначенных, прежде всего, для применения в вольтметрах переменного тока и высокочастотных калибраторах напряжений. Целью работы являлась разработка, изготовление и экспериментальные исследования прототипа измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное для обработки синусоидальных сигналов с частотой от 1 кГц до 50 МГц и сигналов произвольной формы с коэффициентом амплитуды, равным 5. В статье описаны конструктивно-схемотехнические особенности созданного прототипа и результаты измерений его характеристик. Разработанный прототип содержит преобразователь переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения с микросборкой термоэлектрического преобразователя, широкополосный усилитель с восьмикратным усилением, набор электронно коммутируемых масштабирующих усилителей напряжения с коэффициентом передачи, равным 1,36; 2,15; 4,7. Прототип позволяет преобразовать синусоидальный сигнал со среднеквадратическим значением напряжения в диапазоне от 4,7 мВ до 2 В и частотой от 1 кГц до 50 МГц в постоянное напряжение с погрешностью менее $\pm 4\%$, а погрешность преобразования прямоугольного сигнала с коэффициентом амплитуды в диапазоне от 1 до 5 не превышает $\pm 0,2\%$. Измеренная погрешность прототипа сравнима с погрешностью применяемых средств измерений, поэтому реальная погрешность прототипа, возможно, меньше. Кроме того, при уменьшении диапазона напряжений и/или частот регистрируемых сигналов погрешность измерительного преобразователя может быть минимизирована за счёт оптимального выбора коммутируемых масштабирующих усилителей.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, преобразователь переменного напряжения в постоянное, измерение среднеквадратического значения, измерение переменного напряжения

Адрес для переписки:

Дворников О.В.
Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь
e-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by

Address for correspondence:

Dvornikov O.V.
Minsk Research Instrument-Making Institute
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus
e-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by

Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.
Прототип высокоточного измерительного преобразователя переменного напряжения.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 1. С. 31–38.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-1-31-38

For citation:

Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA.
Design of a Set of Analog Microcircuits for Processing Signals from High-Resistance Sensors.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(1):31–38. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-1-31-38

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-1-31-38

Prototype of High-Precision AC Voltage Measuring Converter

O.V. Dvornikov¹, U.N. Bakhur¹, A.G. Bakhir¹, U.M. Lazouski¹, V.A. Tchekhovski²

¹Minsk Research Instrument-Making Institute,
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,
Bobruiskaya str., 11, Minsk 220006, Belarus

Received 18.11.2025

Accepted for publication 12.01.2026

Abstract

Evaluation of electrical signals' level with various shapes, such as sinusoidal or rectangular, pulse trains, random, etc., is most often carried out based on the root-mean-square value of voltage and the peak factor. Analysis performed showed absence of mass-produced domestic high-precision measuring converters of alternating voltage to direct current voltage based on the root-mean-square value, intended primarily for use in alternating current voltmeters and high-frequency voltage calibrators. Aim of this work was to develop, manufacture and experimentally study a prototype measuring converter of alternating voltage to direct current voltage for processing sinusoidal signals with a frequency from 1 kHz to 50 MHz and arbitrary signals with a peak factor equal to 5. Article describes design and circuitry features of the created prototype and of its characteristics measurements' results. The developed prototype contains a measuring converter of alternating voltage to direct current voltage at the root-mean-square level with a thermoelectric converter microassembly, a broadband amplifier with an eight-fold gain, a set of electronically commutated scaling voltage amplifiers with a transmission coefficient equal to 1.36; 2.15; 4.7. The prototype makes it possible to convert a sinusoidal signal with a root-mean-square voltage in the range from 4.7 mV to 2 V and a frequency from 1 kHz to 50 MHz into direct current voltage with an error of less than $\pm 4\%$, and error in converting a rectangular signal with a peak factor in the range from 1 to 5 does not exceed $\pm 0.2\%$. The measured error of the prototype is comparable to the error of the measuring instruments used, therefore the actual error of the prototype is possibly smaller. In addition, by reducing the range of voltages and/or frequencies of the recorded signals the error of the measuring converter can be minimized by optimally selecting the connected scaling amplifiers.

Keywords: thermoelectrical converter, RMS-DC converter, RMS measurement, AC voltage measurement

Адрес для переписки:

Дворников О.В.
Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь
e-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by

Address for correspondence:

Dvornikov O.V.
Minsk Research Instrument-Making Institute
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus
e-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by

Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский,
В.А. Чеховский.
Прототип высокоточного измерительного преобразователя
переменного напряжения.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 1. С. 31–38.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-1-31-38

For citation:

Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM,
Tchekhovski VA.
Design of a Set of Analog Microcircuits for Processing Signals
from High-Resistance Sensors.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(1):31–38. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-1-31-38

Введение

Оценка уровня электрических сигналов различной формы, таких как синусоидальные или прямоугольные, последовательности импульсов, случайные и др., чаще всего проводится по среднеквадратическому значению (СКЗ) и коэффициенту амплитуды.

Так, для изменяющегося с временем напряжения $v(t)$ справедливо [1]:

$$V_{RMS} = \left(\frac{1}{t_{J+1} - t_J} \int_{t_J}^{t_{J+1}} v^2(t) dt \right)^{0.5}; \quad (1)$$

$$k_p = \frac{V_p}{V_{RMS}}; \quad (2)$$

$$V_p = \max_{t \in (t_J, t_{J+1})} |v(t)|; \quad (3)$$

$$t_J = t_0 + jT_p, \quad t_{J+1} = t_0 + (j+1)T_p, \quad (4)$$

где V_{RMS} – СКЗ напряжения; k_p – коэффициент амплитуды; $t_{J+1} - t_J$ – заданный интервал времени, причем для периодических сигналов t_0 – некоторый фиксированный момент времени; T_p – период; $j = 0, 1, 2, \dots$

Для синусоидального сигнала без постоянной составляющей $k_p = 1,414$; $V_{RMS} = 0,707V_p$, а для широко распространённого прямоугольного сигнала [1]:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\tau}{T_p} \left(1 - \frac{\tau}{T_p} \right)} V_{pp}; \quad (5)$$

$$k_p = \sqrt{\frac{T_p}{\tau} - 1}, \quad (6)$$

где τ – длительность импульса; V_{pp} – размах импульса от пика до пика.

Важность регистрации СКЗ напряжения объясняет разработку специальных устройств – измерительных преобразователей переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ), конструктивно значительно отличающихся в зависимости от требуемой погрешности измерений и частотного диапазона входного сигнала [2–6], а также актуальность метрологического обеспечения измерений СКЗ напряжения [7–10].

Проведённый анализ позволил установить отсутствие серийно выпускаемых в странах СНГ высокоточных измерительных ПСКЗ для диапазона частот от 1 кГц до

50 МГц [2], за исключением уникальных прецизионных измерителей переменных напряжений, применяемых в качестве эталонов Государственной поверочной схемы [5, 6].

Важность разработки ПСКЗ именно для этого частотного диапазона объясняется следующими факторами:

– для высокоточного определения СКЗ напряжения сигналов произвольной формы со спектром в полосе частот до 1 кГц целесообразно применение прямого метода, а именно, аналого-цифрового преобразования сигналов и их математической обработки по формуле (1), как реализовано, например, в анализаторе звука и вибраций АШВ-004 для диапазона частот от 2 Гц до 1 кГц;

– для сигналов произвольной формы со спектром в полосе частот более 50 МГц обычно применяются СВЧ-ваттметры [3, 4], а высокоточные измерения синусоидальных сигналов высокой частоты осуществляют с помощью диодно-детекторных технологий [6].

Целью работы являлась разработка, изготовление и экспериментальные исследования прототипа высокоточного измерительного ПСКЗ для обработки синусоидальных сигналов с частотой от 1 кГц до 50 МГц и сигналов произвольной формы с $k_p = 5$.

Конструктивно-схемотехнические особенности прототипа

Для выбранного диапазона частот разработан прототип ПСКЗ (рисунок 1), содержащий микросборку термоэлектрического преобразователя (ТЭП) ПН002 и комплект усилителей разного функционального назначения [11]: мощный широкополосный усилитель с коэффициентом усиления напряжения $K_v = 8$ при работе на 150-омный нагревательный элемент ТЭП и максимальном размахе напряжения в 10 В; набор масштабирующих усилителей с $K_v = 1,36; 2,15; 4,7$, позволяющий за счёт их электронной коммутации в различной последовательности получать усиление от 1,36 до 30,04.

Разработка прототипа базировалась на ранее полученных результатах исследований, подробно рассмотренных в [2, 11]. Главными проблемами были многоэтапная подстройка амплитудно-

частотных характеристик (АЧХ) усилителей для обеспечения их устойчивой работы (без самовозбуждения) при различном сочетании

последовательно соединённых каскадов, а также выполнение высокоточной регистрации нелинейности АЧХ.

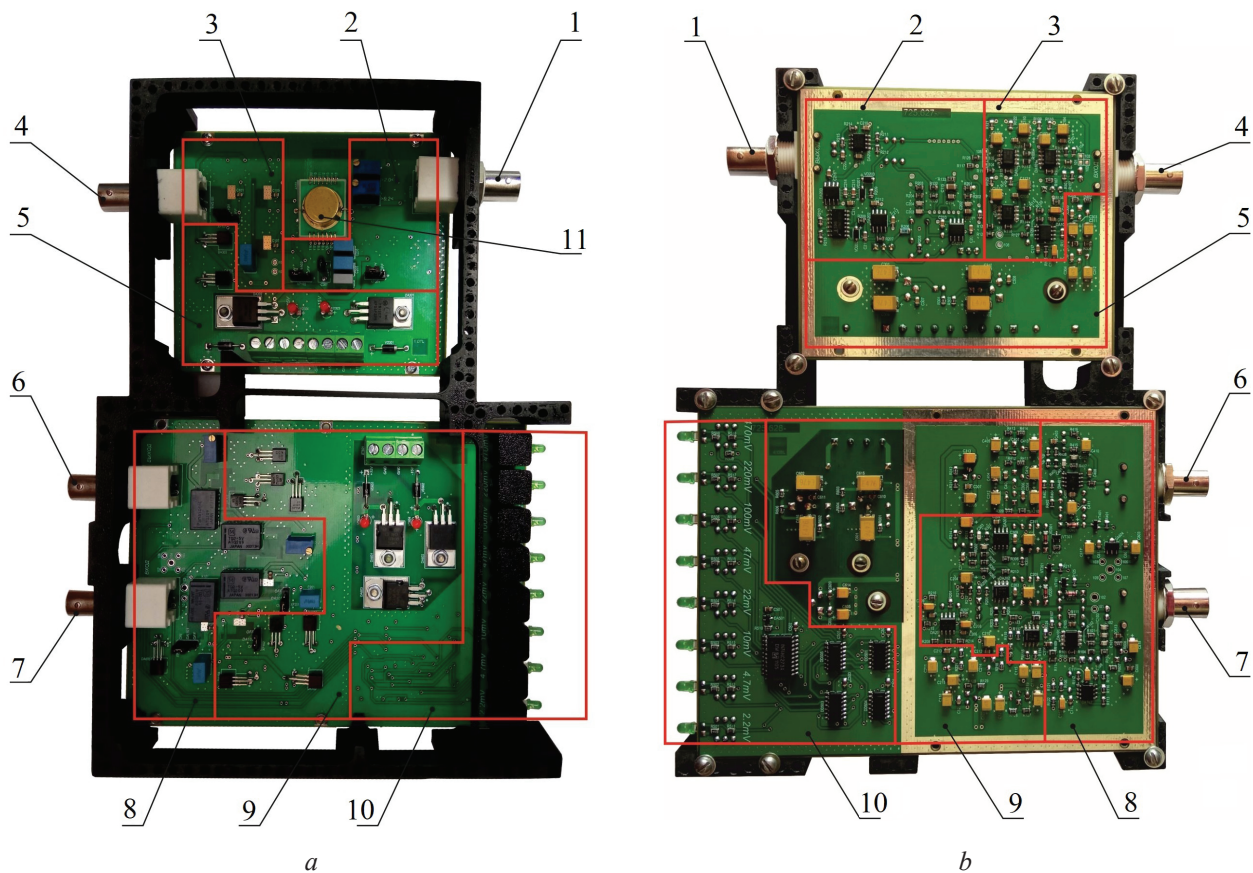


Рисунок 1 – Фотография прототипа высокоточного измерительного преобразователя переменного напряжения: 1 – выход преобразователя; 2 – преобразователь; 3 – широкополосный усилитель; 4 – вход широкополосного усилителя; 5 – стабилизатор напряжения питания; 6 – выход масштабирующего усилителя; 7 – вход масштабирующего усилителя; 8 – масштабирующий усилитель; 9 – стабилизатор напряжения питания; 10 – схема управления коэффициентом передачи масштабирующего усилителя

Figure 1 – Photograph of a prototype of a high-precision AC voltage measuring converter: 1 – converter output; 2 – converter; 3 – wideband amplifier; 4 – wideband amplifier input; 5 – supply voltage regulator; 6 – scaling amplifier output; 7 – scaling amplifier input; 8 – scaling amplifier; 9 – supply voltage regulator; 10 – scaling amplifier gain control circuit

Схемотехническое моделирование не позволило упростить эти работы из-за недостаточной точности моделей применяемых операционных усилителей и невозможности адекватного учёта влияния на АЧХ паразитных параметров комплектующих.

Результаты экспериментальных исследований

Предварительные исследования показали, что разработанный ПСКЗ и масштабирующие

усилители характеризуются крайне малой погрешностью и нелинейностью АЧХ [11]. По указанной причине особое внимание было уделено методикам измерений и выбору применяемого оборудования.

Так, при определении погрешности преобразования синусоидального сигнала с частотой до 200 кГц на вход ПСКЗ поступал синусоидальный сигнал от калибратора *Transmille 3010A precision multiproduct calibrator* и постоянное напряжение на выходе ПСКЗ измерялось вольтметром универсальным

цифровым В7-72. При этом максимальная погрешность оборудования в используемых диапазонах входных сигналов и измерений составляла $\Delta = \pm 0,35 \%$. Для исследований в диапазоне частот синусоидального сигнала от 0,1 МГц до 50 МГц в качестве источника входного напряжения применялся прибор для поверки вольтметров В1-16, измерения входного и выходного напряжения масштабирующих усилителей, а также входного для ПСКЗ, осуществлялось вольтметром переменного тока диодным компенсационным ВЗ-49.В этом случае максимальная погрешность оборудования составляла $\Delta = \pm 1,3 \%$ на частоте 50 МГц.

Несмотря на принятые меры, погрешность используемого оборудования была сравнимой с погрешностью исследуемых устройств, поэтому в полосе частот от 0,1 МГц до 50 МГц определялась нелинейность АЧХ относительно показаний на частоте 100 кГц.

При определении погрешности преобразования сигналов с большим k_p на вход ПСКЗ от генератора сигналов специальной формы Г6-49 поступал прямоугольный периодический сигнал с размахом V_{pp} , периодом $T_p = 1$ мс и длительностью τ . Величина τ изменялась в диапазоне от 0,025 мс до 0,5 мс и по формуле (6) определялся коэффициент амплитуды, значения которого приведены в таблице.

Таблица / Table

Расчетные значения коэффициента амплитуды периодического прямоугольного сигнала при $T_p = 1$ мс

Calculated values of a periodic rectangular signal's peak factor at $T_p = 1$ ms

Длительность импульса, мс	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.075	0.05	0.03	0.025
pulse duration, ms									
Коэффициент амплитуды, peak factor	1	1.22	1.53	2	3	3.51	4.36	5.69	6.25

На основе выражения (5) для каждого значения k_p определялся и устанавливался на выходе Г6-49 размах напряжения V_{pp} такой величины, чтобы для разных сигналов $V_{RMS} = 1$ В. СКЗ напряжения прямоугольного сигнала измерялось на входе ПСКЗ вольтметром Keysight 3458A, а постоянное напряжение на выходе ПСКЗ – вольтметром универсальным цифровым В7-72. Для наихудшего случая при $T_p = 1$ мс, $\tau = 0,025$ мс, $k_p = 6,25$ погрешность Keysight 3458A не превышает $\pm 0,4 \%$.

Основные результаты измерений приведены на рисунках 2–7.

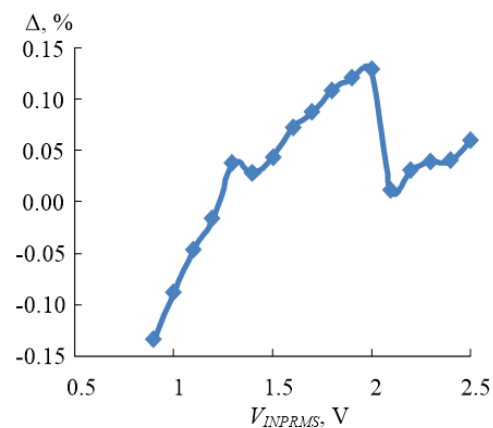


Рисунок 2 – Зависимость погрешности преобразования синусоидального сигнала с частотой 1 кГц от уровня входного напряжения для преобразователя переменного напряжения без усилителя

Figure 2 – Dependence of a sinusoidal signal's conversion error with a frequency of 1 kHz on the input voltage level for a voltage converter without an amplifier

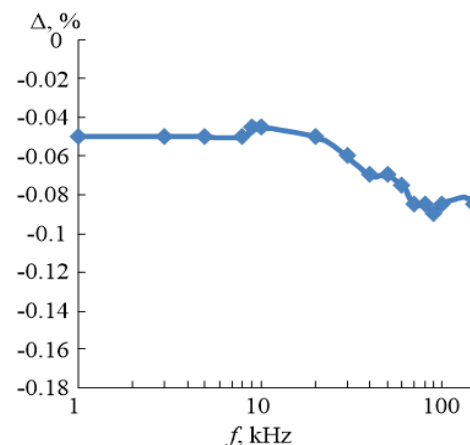


Рисунок 3 – Зависимость погрешности преобразования синусоидального сигнала с $V_{OUTRMS} = 1$ В от частоты для преобразователя переменного напряжения без усилителя

Figure 3 – Dependence of a sinusoidal signal's conversion error with $V_{OUTRMS} = 1$ V on the frequency for a voltage converter without an amplifier

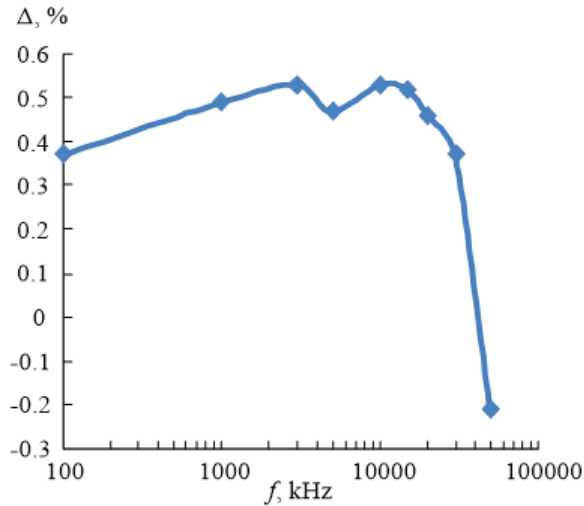


Рисунок 4 – Зависимость погрешности преобразования синусоидального сигнала с $V_{OUTRMS} = 1$ В от частоты для преобразователя переменного напряжения без усилителя

Figure 4 – Dependence of a sinusoidal signal's conversion error with $V_{OUTRMS} = 1$ V on the frequency for a voltage converter without an amplifier

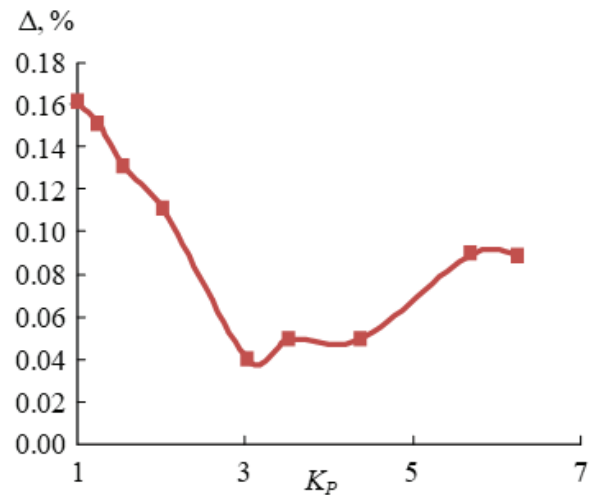


Рисунок 5 – Зависимость погрешности преобразования прямоугольного сигнала с $V_{OUTRMS} = 1$ В от коэффициента амплитуды для преобразователя переменного напряжения без усилителя

Figure 5 – Dependence of a rectangular signal's conversion error with $V_{OUTRMS} = 1$ V on the peak factor for a voltage converter without an amplifier

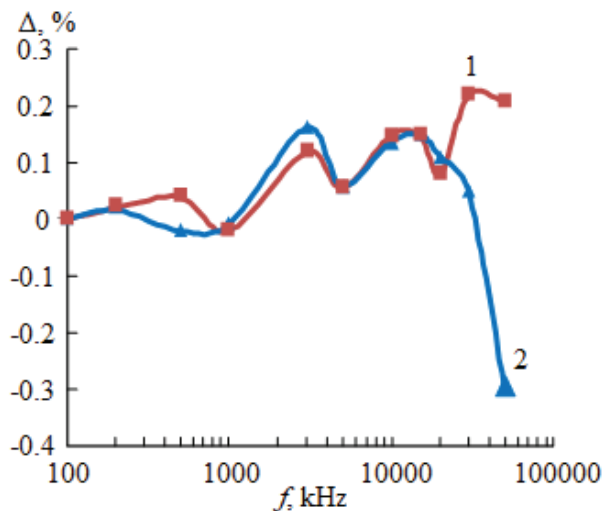


Рисунок 6 – Зависимость нелинейности преобразования синусоидального сигнала для преобразователя переменного напряжения с 8-ми кратным усилителем: 1 – $V_{OUTRMS} = 1$ В; 2 – $V_{OUTRMS} = 2,4$ В

Figure 6 – Dependence of the nonlinearity of a sinusoidal signal's conversion on the frequency for a voltage converter with an 8-fold amplifier: 1 – $V_{OUTRMS} = 1$ V; 2 – $V_{OUTRMS} = 2.4$ V

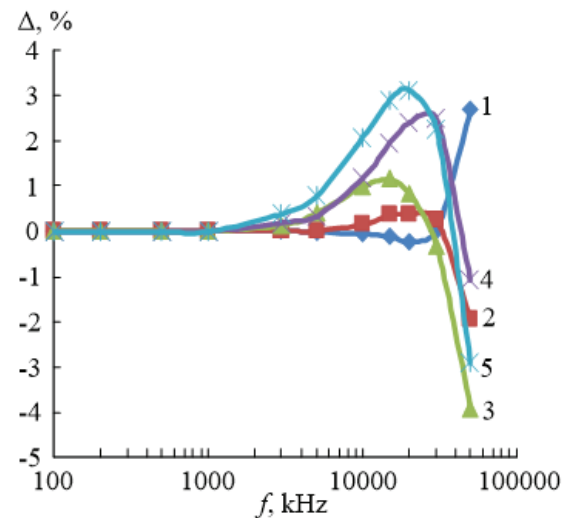


Рисунок 7 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики при $V_{OUTRMS} = 1$ В для масштабирующих усилителей с различным коэффициентом усиления: 1 – $K_V = 1.36$; 2 – $K_V = 2.92$; 3 – $K_V = 6.39$; 4 – $K_V = 13.74$; 5 – $K_V = 30.04$

Figure 7 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic at $V_{OUTRMS} = 1$ V for scaling amplifiers with different gain factors: 1 – $K_V = 1.36$; 2 – $K_V = 2.92$; 3 – $K_V = 6.39$; 4 – $K_V = 13.74$; 5 – $K_V = 30.04$

Результаты проведённых измерений позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный прототип ПСКЗ с ТЭП обеспечивает погрешность преобразования

синусоидальных сигналов менее $\pm 0,6$ % при СКЗ входного напряжения от 1 до 2 В (рисунок 2) и частоте сигналов от 1 кГц до 50 МГц (рисунки 3, 4), а для прямоугольных сигналов

с коэффициентом амплитуды в диапазоне от 1 до 5 погрешность не превышает $\pm 0,2\%$.

2. Сравнение зависимостей, приведённых на рисунках 3 и 4, показывает, что величина погрешности на частоте 100 кГц разная. Данный факт обусловлен применением разных источников входного сигнала при измерениях в частотном диапазоне от 1 до 200 кГц (*Transmille 3010A precision multiproduct calibrator*) и от 100 кГц до 50 МГц (B1-16) и будет в дальнейшем устранен при использовании одного источника входного сигнала, выбранного в зависимости от частотного диапазона необходимого потребителю ПСКЗ.

3. Определённая погрешность ПСКЗ с ТЭП сравнима с погрешностью применяемых приборов: калибратора *Transmille 3010A precision multiproduct calibrator*, прибора для поверки вольтметров B1-16, вольтметра переменного тока ВЗ-49, вольтметра *Keysight 3458A*. Поэтому реальная погрешность ПСКЗ, возможно, меньше, чем показанные на рисунках 2–5.

4. Применение ПСКЗ с дополнительным 8-ми кратным усилителем расширяет диапазон измеряемого входного напряжения до $V_{INPRMS} = 0,125$ В без увеличения погрешности (рисунок 6).

5. Для обеспечения погрешности, не превышающей $\pm 4\%$ (рисунок 7) при V_{INPRMS} от 4,7 до 180 мВ и частоте входного синусоидального сигнала в диапазоне от 1 кГц до 50 МГц, рекомендуется использование набора масштабирующих усилителей с $K_V = 1,36; 2,15; 4,7$, электронная коммутация которых обеспечивает получение пяти перекрывающихся диапазонов измерений с усилением 1,36; 2,924 (1,36·2,15); 6,392 (1,36·4,7); 13,743 (1,36·2,15·4,7); 30,04 (1,36·4,7·4,7).

Заключение

Разработан, изготовлен и исследован прототип высокоточного измерительного преобразователя переменного напряжения, включающий преобразователь переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения с микросборкой термоэлектрического преобразователя, широкополосный усилитель с восьмикратным усилением, набор электронно коммутируемых масштабирующих усилителей с усилением 1,36; 2,15; 4,7.

Созданный прототип позволяет преобразовать синусоидальный сигнал с уровнем среднеквадратического значения напряжения в диапазоне от 4,7 мВ до 2 В и частотой от 1 кГц до 50 МГц в постоянное напряжение с погрешностью менее $\pm 4\%$. При этом погрешность преобразования прямоугольного сигнала с коэффициентом амплитуды в диапазоне от 1 до 5 не превышает $\pm 0,2\%$.

При уменьшении диапазона напряжений и/или частот измеряемых сигналов погрешность измерительного преобразователя может быть дополнительно минимизирована за счёт оптимального выбора коммутируемых масштабирующих усилителей.

Список использованных источников

1. Аминев А.В. Измерения в телекоммуникационных системах / А.В. Аминев, А.В. Блохин; под общей редакцией А.В. Блохина. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 223 с.
2. Дворников О.В. Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока / О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский // Приборы и методы измерений. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 174–185.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185
3. Матвеев А.И. Разработка прецизионных средств измерений СВЧ мощности / А.И. Матвеев, А.В. Пивак, И.П. Чирков. mwelectronics.etu.ru/assets/files/623-627.pdf.
4. Перепелкин В.А. Исследование волноводных прецизионных термоэлектрических преобразователей мощности миллиметрового волн / В.А. Перепелкин, И.П. Чирков, А.И. Матвеев // Альманах современной метрологии. – 2021. – № 2 (26). – С. 37–44.
5. Гуревич М.Л. Новые прецизионные комплекты преобразователей напряжения термоэлектрических ПНТЭ – 37 и результаты их испытаний / М.Л. Гуревич, А.В. Черемохин, В.И. Шевцов, Г.П. Телитченко // Законодательная и прикладная метрология. – 2018. – № 1. – С. 11–15.
6. Гуревич М.Л. Российские электротепловые и диодно-детекторные технологии для прецизионных измерителей переменных напряжений / М.Л. Гуревич, В.И. Шевцов // Законодательная и прикладная метрология. – 2018. – № 3. – С. 30–37.
7. Иванов С.А. Анализ состояния метрологического обеспечения эталонов переменного электрического напряжения до 30 МГц / С.А. Иванов,

А.С. Катков, В.И. Шевцов // Эталоны. Стандартные образцы. – 2025. – Т. 21(2). – С. 136–144.

8. Коудельный А.В. Разработка комплекса аппаратуры для измерений мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц / А.В. Коудельный, И.М. Малай, А.И. Матвеев, В.А. Перепелкин, И.П. Чирков // Альманах современной метрологии. – 2021. – № 2 (26). – С. 25–36.

9. Болмусов Ю.Д. Особенности построения высокочастотных калибраторов напряжения переменного тока. Методы измерений, разработка радиоизмерительной аппаратуры / Ю.Д. Болмусов, В.А. Мартынов // Альманах современной метрологии. – 2019. – № 2 (18). – С. 171–179.

10. Болмусов Ю.Д. Поверка и калибровка широкополосных вольтметров переменного напряжения / Ю.Д. Болмусов, Д.К. Кожеватов, Ю.М. Лещенко, В.Е. Поляков // Главный метролог. – 2011. – № 6. – С. 31–35.

11. Дворников О.В. Конструктивно-схематические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения / О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16. – № 1. – С. 35–46.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

References

1. Aminev AV, Blokhin AV. Measurements in Telecommunication Systems. Moscow, Izdatel'stvo Yurayt, 2024, 223 p.

2. Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA. Arbitrary Wave-form Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(3):174-185. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

3. Matveyev AI, Pivak AV, Chirkov IP. Development of precision microwave power measurement instruments. (In Russ.). mwelectronics.etu.ru/assets/files/623-627.pdf.

4. Perepelkin VA, Chirkov IP, Matveev AI. Study of waveguide precision thermoelectric power converters of millimeter waves. Almanacs of modern metrology. 2021;2(26):37-44. (In Russ.).

5. Gurevich ML, Cheremokhin AV, Shevtsov VI, Telitchenko GP. New precision sets of thermoelectric voltage converters PNTE-37 and the results of their tests. Legislative and applied metrology. 2018;1:11-15. (In Russ.).

6. Gurevich ML, Shevtsov VI. Russian electrothermal and diode-detector technologies for precision alternating voltage meters. Legislative and applied metrology. 2018;3:30-37. (In Russ.).

7. Ivanov SA, Katkov AS, Shevtsov VI. Analysis of the state of metrological support of standards of alternating electric voltage up to 30 MHz. Standards. Standard samples. 2025;21(2):136-144. (In Russ.).

8. Koudelny AV, Malay IM, Matveev AI, Perepelkin VA, Chirkov IP. Development of a set of equipment for measuring the power of electromagnetic oscillations of high accuracy in the frequency range from 78.33 to 118.10 GHz. Almanac of modern metrology. 2021;2(26):25-36. (In Russ.).

9. Bolmusov YuD, Martynov VA. Features of the design of high-frequency AC voltage calibrators. Measurement methods, development of radio measuring equipment. Almanac of modern metrology. 2019;2(18):171-179. (In Russ.).

10. Bolmusov YuD, Kozhevnikov DK, Leshchenko YuM, Polyakov VE. Verification and calibration of wideband AC voltmeters. Chief Metrologist. 2011;6:31-35. (In Russ.).

11. Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA. Design and Circuitry Features of the Measuring Voltage Converters Synthesis. Devices and Methods of Measurements. 2025;16(1):35-46. (In Russ.). **DOI:** 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46