

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

Конструктивно-схемотехнические особенности синтеза измерительных преобразователей 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 21.11.2024

Принята к печати 03.01.2025

В радиоэлектронной аппаратуре часто необходимо оценивать уровень электрических сигналов различной формы, наиболее адекватной характеристикой которых является среднеквадратическое значение напряжения V_{RMS} . Для определения V_{RMS} предпочтительно применение преобразователей переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ) на основе термоэлектрических преобразователей. Известны электрические схемы ПСКЗ с термоэлектрическими преобразователями и сформулированы рекомендации по выбору компонентов для минимизации погрешности преобразования. Однако малая величина погрешности преобразования не является единственным требованием, предъявляемым к ПСКЗ в радиоэлектронной аппаратуре. Обычно необходим поиск компромиссного сочетания набора параметров. Целью работы являлась выработка рекомендаций по схемотехническому и конструктивному синтезу ПСКЗ с разным сочетанием технико-экономических параметров. В статье приведены результаты оценки основных параметров компонентов ПСКЗ, определяющих погрешность, устойчивость к механическим и радиационным воздействиям, стоимость при малосерийном производстве. Сравнение компонентов проведено на основе экспериментальных данных и представлено в виде таблиц и графиков результатов измерений, использование которых позволяет провести синтез измерительных преобразователей напряжения с различным сочетанием технико-экономических показателей. Сформулированы конкретные рекомендации по проектированию трёх типов измерительных преобразователей: дешёвого со средним уровнем параметров, прецизионного, радиационно-стойкого.

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@tut.by

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.
Конструктивно-схемотехнические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 35–46.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

For citation:

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

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-45

Design and Circuitry Features of the Measuring Voltage Converters Synthesis

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

¹JSC "Minsk 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 21.11.2024

Accepted for publication 03.01.2025

Abstract

In electronic equipment it is often necessary to estimate the level of electrical signals of various shapes, the most adequate characteristic of which is the root-mean-square value of voltage V_{RMS} . It is preferable to use alternating current-to-direct current converters by the root-mean-square value (so called RMS-DC converter) based on thermoelectric converters to determine V_{RMS} for which electrical circuits have been developed and recommendations for selecting components to minimize the conversion error have been formulated. However a small value of the conversion error is not the only requirement for the RMS-DC converters in electronic equipment. It is usually necessary to search for a compromise combination of a set of parameters. The aim of the work is to develop recommendations for the circuit and design synthesis of RMS-DC converters with different combinations of technical and economic parameters. The article presents results of the RMS-DC converter components main parameters assessing that determine the error, resistance to mechanical and radiation effects, and the cost in small-scale production. Comparison of components is carried out on the basis of experimental data, presented in the form of tables and graphs based on the results of measurements, use of which allows for synthesis of measuring voltage converters with various combinations of technical and economic parameters. Specific recommendations for selection of components for three types of measuring converters: inexpensive with an average level of parameters, precision, radiation-resistant are formulated.

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@tut.by

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.
Конструктивно-схематические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 1. С. 35–46.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

For citation:

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

Введение

В радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) часто необходимо оценивать уровень электрических сигналов различной формы, таких как: синусоидальные или прямоугольные с постоянной составляющей, последовательности импульсов, случайные и др.

Наиболее адекватной характеристикой таких сигналов является среднеквадратическое значение напряжения V_{RMS} , для определения которого предпочтительно применение преобразователей переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ) на основе термоэлектрических преобразователей (ТЭП) [1].

В последнее время были разработаны типовые схемотехнические решения ПСКЗ и сформулированы рекомендации по выбору операционных усилителей (ОУ) и ТЭП для минимизации погрешности преобразования [1, 2]. Однако малая величина погрешности преобразования не является единственным требованием, предъявляемым к ПСКЗ. Обычно необходим поиск компромиссного

сочетания погрешности преобразования, допустимого спектра частот входного сигнала, массогабаритных параметров, стоимости изготовления при малосерийном производстве, устойчивости к внешним воздействующим факторам: температуре, проникающей радиации (ПР), механическим воздействиям.

Целью работы являлась выработка рекомендаций по конструктивному и схемотехническому синтезу ПСКЗ с разным сочетанием технико-экономических параметров.

Типовые электрические схемы

Экспериментально апробированная электрическая схема измерительного ПСКЗ приведена на рисунке 1, а особенности её работы и методика схемотехнической оптимизации подробно рассмотрены в [1, 2]. Заметим, что минимальная погрешность ПСКЗ обеспечивается при относительно больших значениях V_{RMS} , поэтому на вход (узел *in* на рисунке 1) целесообразно подавать напряжение через входной усилитель, изображенный на рисунке 2.

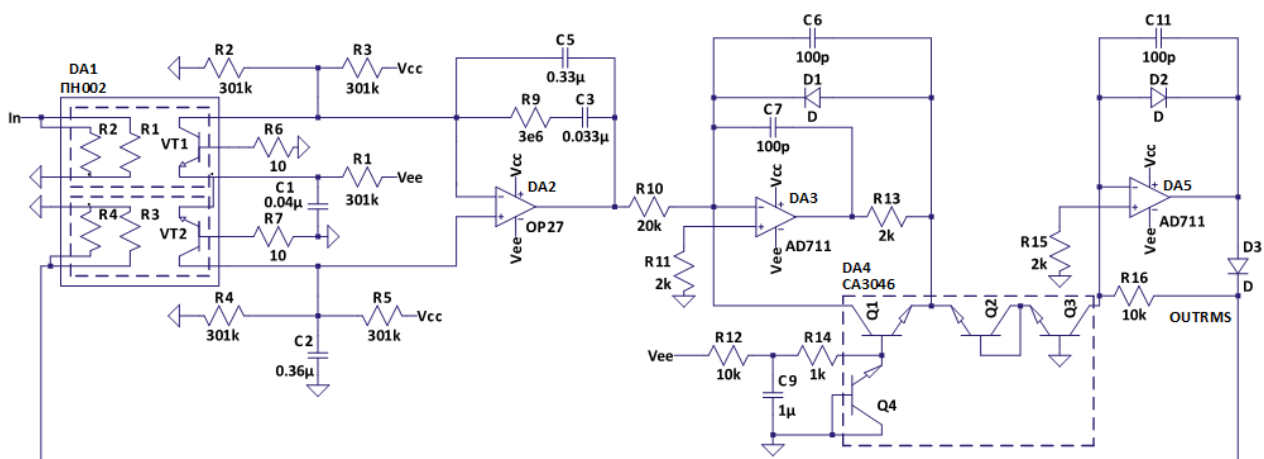


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема измерительного преобразователя переменного напряжения

Figure 1 – Simplified electrical circuit of the measuring alternating current voltage converter

Показанные на рисунках 1, 2 электрические схемы могут быть применены без изменений, однако, в некоторых случаях не смогут обес-

печить требуемый уровень технико-экономических параметров разрабатываемой РЭА без правильного выбора используемых компонентов.

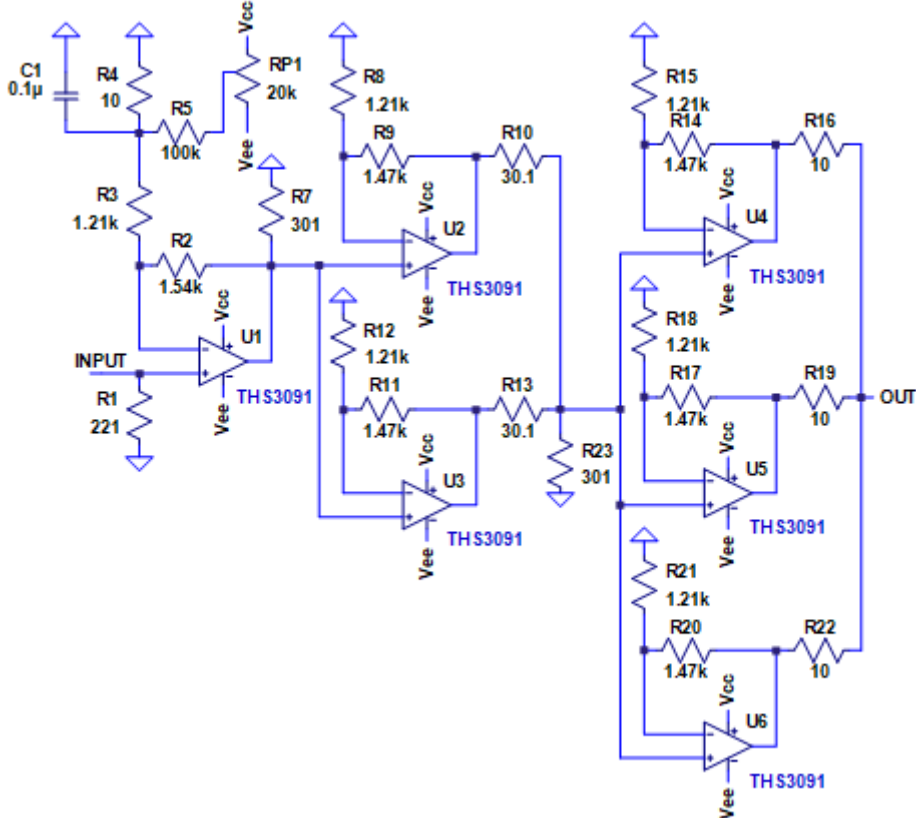


Figure 2 – Simplified electrical circuit of the input amplifier

Выбор термоэлектрического преобразователя

Термоэлектрический преобразователь DA1 на рисунке 1 содержит два одинаковых полупроводниковых кристалла, каждый из которых включает *n-p-n*-транзистор и нагревательные резисторы. В ТЭП ПН002-01, ПН002-02 имеется два поликремниевых резистора с сопротивлением 350 ± 70 Ом и 250 ± 50 Ом соответственно, в ПН002-03 – один полупроводниковый резистор с сопротивлением 300 ± 60 Ом. Кристаллы могут быть размещены на теплоизолирующей эбонитовой подложке толщиной 400 мкм в 16-ти выводном корпусе Н04.16-1, в этом случае ТЭП будет представлять собой микросхему, или на теплоизолирующей полиимидной плёнке толщиной 50 мкм при реализации ТЭП в виде микросборки [1]. Так как теплопроводность полиимидной плёнки сравнима с теплопроводностью эбонита, но толщина почти в 8 раз меньше, то рассеиваемая нагревательным резистором мощность должна в большей степени на

гревать термочувствительный транзистор в микросборке из-за уменьшения теплоотвода от кристалла в окружающую среду.

Необходимость реализации двух конструкций ТЭП объясняется тем, что микросхемы обычно обеспечивают высокий уровень стойкости к механическим воздействиям^{*}, а требования по стойкости к внешним воздействующим факторам микросборок устанавливаются в соответствии с техническими требованиями к конкретной РЭА и поэтому могут быть существенно ниже^{**}, ^{***}, как показано в таблице 1. В тоже время коэффициент термоэлектрического преобразования мощности, рассеиваемой на нагревательных резисторах, в напряжение на прямосмещенном эмиттерном переходе *n-p-n*-транзистора больше для

* Микросхемы интегральные. Общие технические условия. ГОСТ 18725-83.

** Микросборки. Общие технические условия.
ГОСТ 28431-90

*** Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. ГОСТ 22261-94.

микросборки. Статические, динамические параметры и стойкость к воздействию ПР обусловлена, в основном, характеристиками полупроводниковых кристаллов и не зависит от конструктивного исполнения ТЭП.

При выборе конкретного исполнения ТЭП следует принимать во внимание информацию, содержащуюся в таблице 2, и результаты измерений погрешности преобразования ПСКЗ на рисунках 3, 4.

Таблица 1 / Table 1

Требования к допустимым механическим воздействиям

Requirements for permissible mechanical impacts

Вид механического воздействия Type of mechanical action	Микросхемы ГОСТ 18725-83. Integrated circuits. GOST 18725-83	Микросборки ГОСТ 22261-94 Microassemblies. GOST 22261-94
– синусоидальная вибрация / sinusoidal vibration		
1) диапазон частот, Гц / frequency range, Hz	от 1 до 2000	от 10 до 150
2) амплитуда ускорения, м.с ⁻² (g) acceleration amplitude, m.s ⁻² (g)	200(20)	40(4)
– механический удар одиночного действия: single action mechanical impact		
1) пиковое ударное ускорение, м.с ⁻² (g) peak impact acceleration, m.s ⁻² (g)	1500(150)	250(25)
2) длительность удара, мс / impact duration, ms	от 0.1 до 2.0	6
– механический удар многократного действия: multiple action mechanical impact		
1) пиковое ударное ускорение, м.с ⁻² (g) peak impact acceleration, m.s ⁻² (g)	1500 (150)	500(50)
2) длительность удара, мс / impact duration, ms	от 1 до 5	3
– линейное ускорение, м.с ⁻² (g) linear acceleration, m.s ⁻² (g)	5000 (500)	–

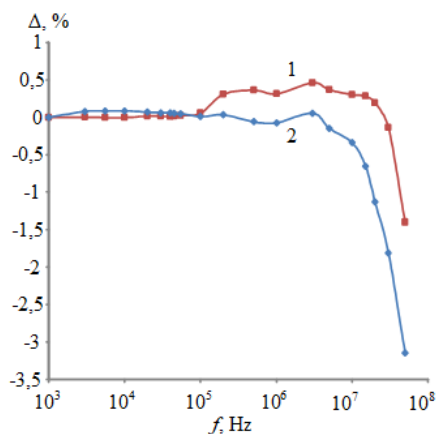


Рисунок 3 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики преобразователя переменного напряжения при использовании: 1 – термоэлектрического преобразователя варианта 1 и $V_{RMS} \approx 2$ В; 2 – термоэлектрического преобразователя варианта 3 и $V_{RMS} \approx 1,25$ В

Figure 3 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic of the alternating current voltage converter when using: 1 – thermoelectric converter option 1 and $V_{RMS} \approx 2$ V; 2 – thermoelectric converter option 3 and $V_{RMS} \approx 1,25$ V

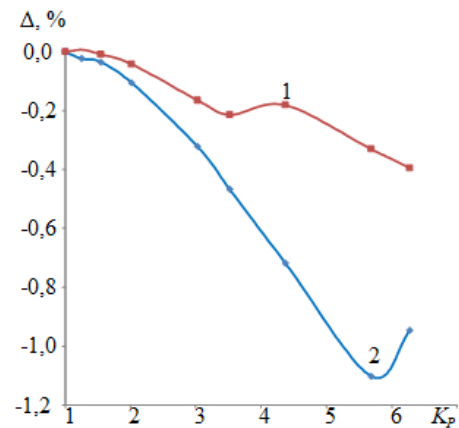


Рисунок 4 – Зависимость погрешности преобразователя переменного напряжения с термоэлектрическим преобразователем варианта 1 от коэффициента амплитуды K_p : 1 – $V_{RMS} \approx 1,2$ В; 2 – $V_{RMS} \approx 1,8$ В

Figure 4 – Dependence of the alternating current voltage converter's error with a thermoelectric converter of option 1 on the peak factor K_p : 1 – $V_{RMS} \approx 1.2$ V; 2 – $V_{RMS} \approx 1.8$ V

Таблица 2 / Table 2

Основные технико-экономические параметры термоэлектрических преобразователей

Main technical and economic parameters of thermoelectric converters

Вариант / Option	1	2	3
Тип прибора Device type	микросборка microassembly	микросхема integrated circuit	микросборка microassembly
Особенности конструкции Design features	полиимидная подложка, два параллельно соединенных поликремниевых нагревательных резистора polyimide substrate, two parallel-connected polysilicon heating resistors	эбонитовая подложка, два параллельно соединенных поликремниевых нагревательных резистора ebonite substrate, two parallel connected polysilicon heating resistors	полиимидная подложка, один полупроводниковый нагревательный резистор polyimide substrate, one semiconductor heating resistor
Сопротивление нагревательного резистора, Ом Heating resistor resistance, Ohm	146	155	328
Коэффициент термоэлектрического преобразования, мВ/мВт Thermoelectric conversion coefficient, mV/mW	3.18	3.12	2.73
Стойкость к механическим воздействиям Resistance to mechanical impacts	низкая, ГОСТ 22261-94 low, GOST 22261-94	высокая, ГОСТ 18725-83 high, GOST 18725-83	низкая, ГОСТ 22261-94 low, GOST 22261-94
Допустимая поглощенная доза гамма-излучения, Мрад Permissible absorbed dose of gamma radiation, Mrad	0.5	0.5	0.5
Ориентировочная стоимость, \$ Estimated cost, \$	82.24	22.94	82.24

Выбор операционного усилителя для измерительного преобразователя переменного напряжения

Схемотехническое моделирование ПСКЗ на рисунке 1 позволило установить, что [2]:

– наиболее значительно влияет на работоспособность и погрешность ПСКЗ при малых входных сигналах напряжение смещения нуля V_{OFF} входного дифференциального каскада на ТЭП DA1, а вторым по значимости фактором является напряжение смещения нуля ОУ интегратора DA2;

– применение конденсаторов в цепях обратной связи ОУ накладывает ограничение на допустимую величину их входного тока;

– при использовании высокоомных резисторов в коллекторах $n-p-n$ -транзисторов ТЭП DA1 следует максимально уменьшать входной ток и разность входных токов ОУ DA2.

Использование ОУ типа OP27, AD711 в схеме ПСКЗ обусловлено только их широким распространением, доступностью в приобретении и низкой стоимостью. При необходимости, вместо OP27 можно применять любой прецизионный ОУ с малым входным током и шумами, например, ADA4522, а вместо AD711 –

двухканальный ОУ с входными полевыми транзисторами, управляемыми p - n -переходом (junction field-effect transistor, JFET).

Проблемы возникают при выборе ОУ для радиационно-стойкого ПСКЗ т. к.:

- напряжение смещения нуля КМОП ОУ значительно изменяется при воздействии гамма-излучения [3]. В КМОП ОУ со стабилизацией прерыванием (chopper stabilised amplifiers) обеспечивается минимальное значение напряжения смещения нуля даже при воздействии ПР [4], однако такие ОУ характеризуются большим временем восстановления после перегрузки. Кроме того, КМОП ОУ обычно имеют повышенный уровень низкочастотного шума, значительно возрастающий при воздействии гамма-облучения;

- малые входные токи в ОУ с биполярными транзисторами часто получают либо путём применения цепей компенсации входного тока (OP27), либо при малых коллекторных токах входных транзисторов (LM158). Оба этих способа не обеспечивают сохранение малого входного тока при воздействии ПР из-за значительного падения коэффициента усиления базового тока в схеме с общим эмиттером β , кроме того, различного для n - p - n - и p - n - p -транзисторов [5, 6];

- в ОУ с входными JFET при воздействии гамма-излучения наблюдается существенное увеличение входного тока и напряжения смещения нуля. Последнее вызвано изменением напряжения отсечки входных JFET из-за влияния паразитных МОП-структур и падением коэффициента β биполярных транзисторов, соединённых с входными JFET [7–9].

С нашей точки зрения, по ряду причин при создании радиационно-стойкого ПСКЗ целесообразно применять базовый матричный кристалл (БМК) МН2ХА031.

Так, на одном кристалле этого БМК можно сформировать все элементы, показанные на рисунке 1, за исключением ТЭП, высокоомных резисторов и конденсаторов, что существенно уменьшит массогабаритные параметры ПСКЗ, причём ОУ DA2, DA3, DA5 могут быть заменены на ранее спроектированный усилитель OAmpl1.3 с входными JFET (рисунок 5), подробно рассмотренный в [10].

Как показали экспериментальные исследования уменьшение напряжения отсечки и максимального тока стока использованных во входном каскаде ОУ OAmpl1.3 двухзатворных p -JFET не превышает 5 % при поглощённой дозе гамма-излучения до 1 Мрад и флюенсе нейтронов до 10^{13} н/см² [6], что обусловлено их конструкцией с центрально расположенной областью стока, окружённой верхним затвором, малой толщиной базового окисла и формированием верхнего n^+ -затвора непосредственно через окно в базовом окисле, предельно уменьшающем влияние паразитных МОП-структур на параметры p -JFET. Более того, соединение с входом ОУ только верхних затворов уменьшает входной ток почти в 10 раз при незначительном ухудшении других характеристик, как показано в таблице 3, а возросший при воздействии ПР входной ток всё равно существенно меньше входного тока OP27 в нормальных условиях.

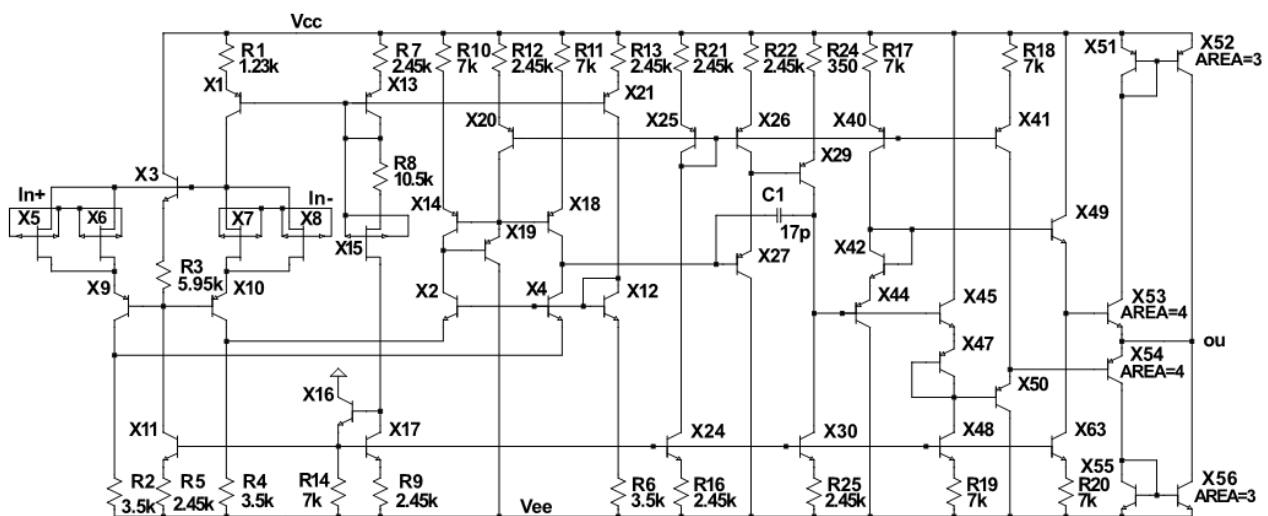


Рисунок 5 – Электрическая схема операционного усилителя OAmpl1.3

Figure 5 – Electrical circuit of the OAmpl1.3 operational amplifier

Таблица 3 / Table 3

Основные технико-экономические параметры операционных усилителей, предназначенных для преобразователя переменного напряжения и входного усилителя

Main technical and economical parameters of operational amplifiers intended for the alternating current voltage converter and input amplifier

Наименование параметра Parameter name	OАmp 11.3	OАmp 11.31*	OP27A/E	AD711C	THS3091	THS3491
Ток потребления в режиме холостого хода, мА Current consumption in idle mode, mA	2.304	2.873	4.7	2.8	9.5	17.3
Напряжение смещения нуля, мкВ Input offset voltage, uV	123	55	25	250	3000	2000
Входной ток Input bias current	34.7 пА 34.7 pA	4.1 пА 4.1 pA	±40 нА ±40 nA	25 пА 25 pA	15 мкА 15 uA	5 мкА 5 uA
Частота единичного усиления, МГц Unity gain frequency, MHz	3.84	2.85	5.0	3.4	675	320
Спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу при $f = 1$ кГц, нВ/Гц ^{0.5} Input voltage noise, at $f = 1$ kHz, nV/Hz ^{0.5}	8.24	11.58	3.8	16.0	2.0	1.7
Стоимость, \$ Cost, \$	16.6**	16.6**	1.99	3.67	21.71	45.86
Допустимая поглощенная доза гамма-излучения, Мрад Permissible absorbed dose of gamma radiation, Mrad	1.0	1.0	0.05	0.05	>1.0	>1.0

Примечание:

*OАmp 11.31 представляет собой усилитель OАmp 11.3, у которого со входом соединены только верхние затворы двухзатворных р-JFET.

** С учетом изготовления минимально возможной партии из 3-х полупроводниковых пластин

Note:

*OАmp 11.31 is an OАmp 11.3 amplifier with only the top gates of the dual-gate *p*-JFETs connected to the input.

** Taking into account the production of a minimum possible batch of 3 semiconductor wafers.

О радиационной стойкости ОУ OАmp11.3, нейтронов F_N , оказывающих более сильное влияние на параметры ОУ, чем облучение моделирования их передаточной характеристики (рисунки 6, 7) при разных флюенсах гамма-квантами с поглощённой дозой 1 Мрад.

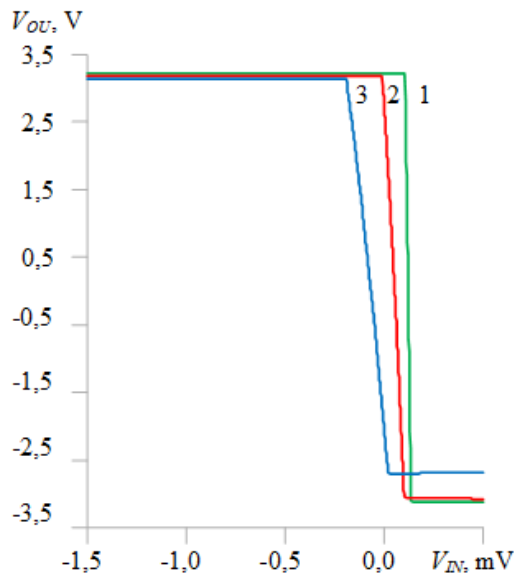


Рисунок 6 – Зависимость выходного напряжения V_{OU} от входного V_{IN} OAmpl1.3: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 122 \text{ мкВ}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 53 \text{ мкВ}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -67 \text{ мкВ}$

Figure 6 – Output voltage V_{OU} versus input V_{IN} of operational amplifier OAmpl1.3: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 122 \text{ uV}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 53 \text{ uV}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -67 \text{ uV}$

Как следует из результатов моделирования, оба усилителя OAmpl1.3, OAmpl1.31 обеспечивают работоспособность ПСКЗ при поглощённой дозе гамма-излучения, равной 1 Мрад, и воздействии флюенса нейтронов $F_N = 1 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$.

Выбор операционного усилителя для входного усилителя

Главными требованиями, предъявляемыми к входному усилителю, являются обеспечение малой нелинейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), желательно менее 1 %, в полосе частот синусоидального сигнала до 50 МГц и размаха выходного сигнала 12 В при работе на нагрузку около 150 Ом.

Для обеспечения указанных требований экспериментально исследовались несколько вариантов входных усилителей с разными ОУ и коэффициентами усиления K_V , работающих на нагрузку 150 Ом:

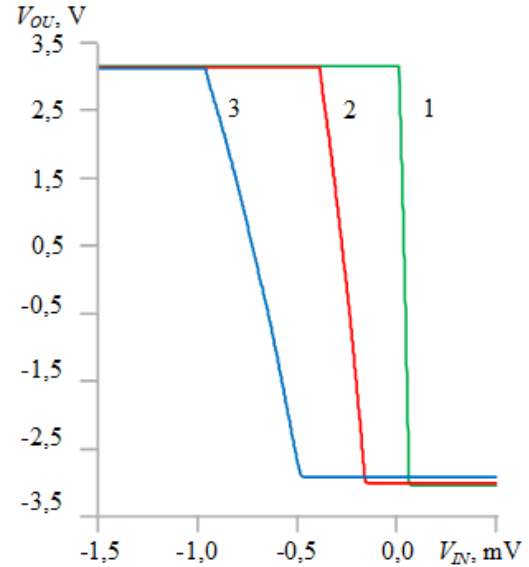


Рисунок 7 – Зависимость выходного напряжения V_{OU} от входного V_{IN} OAmpl1.31: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 41 \text{ мкВ}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -254 \text{ мкВ}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -684 \text{ мкВ}$

Figure 7 – Output voltage V_{OU} versus input V_{IN} of operational amplifier OAmpl1.31: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 41 \text{ uV}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -254 \text{ uV}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -684 \text{ uV}$

– однокаскадный усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2;

– трёхкаскадный усилитель с $K_V \approx 10$ на THS3091AR2 с тремя параллельно соединёнными микросхемами на выходе;

– однокаскадный усилитель с $K_V \approx 4,5$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3491AR2;

– двухкаскадный усилитель с $K_V \approx 8$ на THS3491AR2 с двумя параллельно соединёнными микросхемами на выходе.

Результаты измерений АЧХ выходных усилителей разных вариантов показаны на рисунках 8, 9.

Сравнение нелинейности АЧХ в полосе частот, количества применяемых ОУ, тока потребления ОУ и их цены, приведённых в таблице 3, позволяет разработать входной усилитель с требуемым сочетанием параметров.

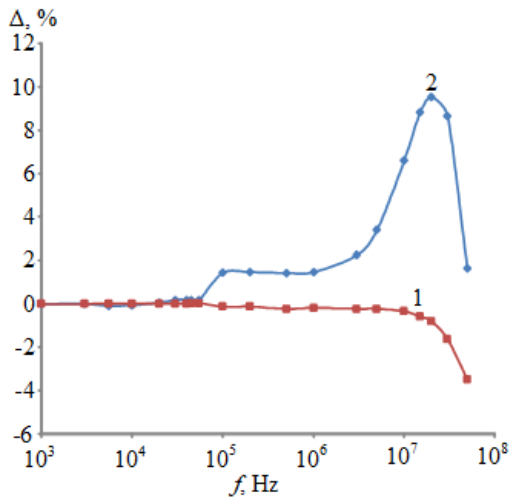


Рисунок 8 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики: 1 – усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2; 2 – трёхкаскадный усилитель с $K_V \approx 10$ на THS3091AR2 с тремя параллельно соединёнными микросхемами на выходе

Figure 8 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic: 1 – amplifier with $K_V \approx 2$ on two parallel-connected THS3091AR2 microcircuits; 2 – three-stage amplifier with $K_V \approx 10$ on THS3091AR2 with three parallel-connected microcircuits at the output

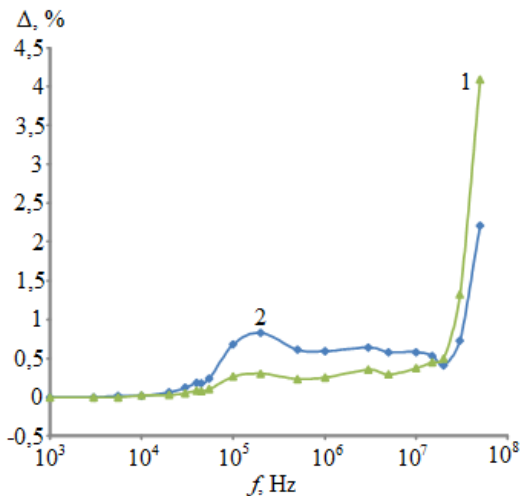


Рисунок 9 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики: 1 – усилитель с $K_V \approx 4,5$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3491AR2; 2 – двухкаскадный усилитель с $K_V \approx 8$ на THS3491AR2 с двумя параллельно соединёнными микросхемами на выходе

Figure 9 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic: 1 – amplifier with $K_V \approx 4.5$ on two parallel-connected THS3491AR2 microcircuits; 2 – two-stage amplifier with $K_V \approx 8$ on THS3491AR2 with two parallel-connected microcircuits at the output

Таким образом, возможны различные сочетания компонентов в зависимости от требуемых технико-экономических показателей ПСКЗ, из которых в качестве основных можно выделить:

- для дешевого ПСКЗ со средним уровнем параметров целесообразно применять схему, показанную на рисунке 1, с ОУ OP27, AD711, входной однокаскадный усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2 и микросхему ТЭП с суммарным сопротивлением поликремниевых нагревательных резистора около 150 Ом;

- для ПСКЗ с высоким уровнем параметров в схеме рисунка 1 следует использовать ОУ ADA4522, а также входной двухкаскадный усилитель с $K_V \approx 8$ на THS3491AR2 с двумя параллельно соединёнными микросхемами на выходе и микросборку ТЭП с суммарным сопротивлением поликремниевых нагревательных резистора около 150 Ом;

- в радиационно-стойком ПСКЗ рекомендуется все возможные элементы схемы рисунка 1 реализовать на БМК МН2ХА031 с использованием трехканального ОУ OAmP 11.31, применять входной однокаскадный усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2 и микросхему ТЭП с суммарным сопротивлением поликремниевых нагревательных резистора около 150 Ом.

Заключение

Для типовой схемы измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное, содержащего термоэлектрический преобразователь, и его входного усилителя выполнена оценка основных параметров применяемых компонентов, определяющих погрешность, устойчивость к механическим и радиационным воздействиям и стоимость при малосерийном производстве.

Сравнение компонентов проведено на основе экспериментальных данных, представлено в виде таблиц и графиков результатов измерений, использование которых позволяет провести синтез измерительных преобразователей напряжения с различным сочетанием технико-экономических показателей.

Сформулированы конкретные рекомендации по выбору компонентов для трёх типов

измерительных преобразователей: дешёвого со средним уровнем параметров, прецизионного, радиационно-стойкого.

Список использованных источников

1. Дворников О.В. Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока / О.В. Дворников [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2024. – Т. 15. – № 3. – С. 174–185.

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

2. Галкин Я.Д. Прецизионный преобразователь переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения / Я.Д. Галкин, О.В. Дворников, В.А. Чеховский // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22. – № 1. – С. 30–38.

DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-1-30-38

3. Benson R. Characterization and Analyses of Rad-Hard-by-Design CMOS Quad Operational Amplifiers / R. Benson, P. Resch, R. Milanowski // 2013 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), San Francisco, CA, USA. – 2013. – Pp. 1–7.

DOI: 10.1109/REDW.2013.6658185

4. Agarwal V. A comparative study of gamma radiation effects on ultra-low input bias current linear circuits under biased conditions / V. Agarwal, V.P. Sundarsingh, V. Ramachandran // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – Vol. 52. – No. 2. – Pp. 510–518.

DOI: 10.1109/TNS.2005.846872

5. Myers B. ELDRS Characterization up to 100 krad of Texas Instruments' Dual Amplifier LM158 / B. Myers, K. Kruckmeyer, T. Trinh // 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), New Orleans, LA. – 2017. – Pp. 1–5.

DOI: 10.1109/NSREC.2017.8115458

6. Прокопенко Н.Н. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков: монография / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, А.В. Бугакова. – М.: СОЛЮН-Пресс, 2021. – 200 с.

7. Flament O. Enhanced total dose damage in junction field effect transistors and related linear integrated circuits / O. Flament, J.L. Autran, P. Roche, J.L. Leray, O. Musseau, R. Truche // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – Vol. 43, No. 6. – Pp. 3060–3067.

DOI: 10.1109/23.556905

8. Pease R.L. Total dose induced increase in input offset voltage in JFET input operational amplifiers / R.L. Pease, J. Krieg, M. Gehlhausen, D. Platteter, J. Black // 1999 Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. RADECS 99 (Cat. No.99TH8471), Fontevraud, France. – 1999. – Pp. 569–572.

DOI: 10.1109/RADECS.1999.858649

9. Harris R.D. Degradation of RH1056 parameters at low total dose / R.D. Harris, B.G. Rax, S.S. McClure, A.H. Johnston // 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Deauville, France. – 2007. – Pp. 1–5.

DOI: 10.1109/RADECS.2007.5205557

10. Дворников О.В. Сравнительный анализ двух- и однокаскадных ВJT-JFET операционных усилителей / О.В. Дворников [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 230–240.

DOI: 10.18522/2311-3103-2023-4-230-240

References

1. 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

2. Galkin YAD, Dvornikov OV, Tchekhovski VA. Precision RMS-to-DC Converter. BSUIR Reports. 2024;22(1):30-38. (In Russ.).

DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-1-30-38

3. Benson R, Resch P, Milanowski R. Characterization and Analyses of RadHard-by-Design CMOS Quad Operational Amplifiers. 2013 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), San Francisco, CA, USA. 2013;1-7. **DOI:** 10.1109/REDW.2013.6658185

4. Agarwal V, Sundarsingh VP, Ramachandran V. A comparative study of gamma radiation effects on ultra-low input bias current linear circuits under biased conditions. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2005;52(2):510-518. **DOI:** 10.1109/TNS.2005.846872

5. Myers B, Kruckmeyer K, Trinh T. ELDRS Characterization up to 100 krad of Texas Instruments' Dual Amplifier LM158. 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), New Orleans, LA. 2017;1-5.

DOI: 10.1109/NSREC.2017.8115458

6. Prokopenko NN, Dvornikov OV, Bugakova AV. Design of low-temperature and radiation-resistant analog microcircuits for processing sensor signals. Moscow, SOLON-Press. 2021;200 p.

7. Flament O, Autran JL, Roche P, Leray JL, Musseau O, Truche R. Enhanced total dose damage in junction field effect transistors and related linear integrated circuits. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996;43(6):3060-3067. **DOI:** 10.1109/23.556905

8. Pease RL, Krieg J, Gehlhausen M, Platteter D, Black J. Total dose induced increase in input offset voltage in JFET input operational amplifiers. 1999 Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. RADECS 99 (Cat. No.99TH8471), Fontevraud, France. 1999;569-572.

DOI: 10.1109/RADECS.1999.858649

9. Harris RD, Rax BG, McClure SS, Johnston AH. Degradation of RH1056 parameters at low total dose. 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Deauville, France. 2007:1-5.

DOI: 10.1109/RADECS.2007.5205557

10. Dvornikov OV, Chekhovsky VA, Prokopenko NN, Kunz AV, Chumakov VE. Comparative analysis of two- and single-stage BJT-JFET operational amplifiers. Bulletin of SFedU. Technical sciences. 2023;(4):230-240. (In Russ.).

DOI: 10.18522/2311-3103-2023-4-230-240