

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

А. В. Светлов¹, А. С. Колдов²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка и исследование амплитудного детектора с малой погрешностью преобразования амплитуды синусоидального напряжения в постоянное напряжение. *Материалы и методы.* Исследуется амплитудный детектор, реализующий метод неявных вычислений среднеквадратичных значений переменного напряжения. *Результаты.* Приведены структурная схема амплитудного детектора, методика и результаты его экспериментальных исследований. В диапазоне амплитуд синусоидального напряжения от 5 до 10 В и частот от 100 Гц до 1 МГц относительная погрешность преобразования среднеквадратичного значения напряжения не более $\pm 2\%$, а относительная погрешность преобразования амплитуды напряжения – не более $\pm 1,5\%$. *Выводы.* Подтверждена возможность применения амплитудного детектора, реализующего метод неявных вычислений среднеквадратичных значений переменного напряжения, для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей.

Ключевые слова: исследование, амплитудный детектор, синусоидальное напряжение

Для цитирования: Светлов А. В., Колдов А. С. Исследование амплитудного детектора для измерителей параметров резонансных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 84–91. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-10

INVESTIGATION OF AN AMPLITUDE DETECTOR FOR RESONANT ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETER METERS

A.V. Svetlov¹, A.S. Koldov²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to develop and investigate a minor-error amplitude detector for converting the amplitude of a sine wave voltage into the direct current voltage. *Materials and methods.* The implicit method for calculating the root mean square (rms) values of alternating voltage has been implemented to investigate the amplitude detector. *Results.* A block diagram for the amplitude detector along with the research methodology and outcomes are presented. Provided the sinusoidal voltage waveform is with 5 V to 10 V amplitude and 100 Hz to 1 MHz frequency, the relative error in converting the rms voltage value falls short of $\pm 2\%$, and the relative error in converting the voltage amplitude being $\pm 1.5\%$. *Conclusions.* The feasibility of using an amplitude detector that implements the implicit method for calculating the rms values of alternating voltage to develop means for measuring resonant electrical circuit parameters has been substantiated.

Keywords: investigation, amplitude detector, sinusoidal voltage

For citation: Svetlov A.V., Koldov A.S. Investigation of an amplitude detector for resonant electrical circuit parameter meters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):84–91. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-10

Введение

Для определения параметров резонансных электрических цепей их включают в состав специально создаваемых измерительных цепей, на вход которых подают тестовые синусоидальные сигналы. Перестраивая частоту тестового сигнала, находят резонансные частоты исследуемой

цепи и значения амплитуды выходного синусоидального напряжения измерительной цепи в особых точках ее амплитудно-частотной характеристики для определения добротности и эквивалентных электрических параметров исследуемой цепи в соответствии с принятой для измерения эквивалентной электрической схемой цепи [1]. Погрешность, с которой амплитудным детектором (АД) определяются значения амплитуды выходного синусоидального напряжения измерительной цепи, непосредственно влияет на погрешность определения параметров резонансных электрических цепей. Поэтому важной и актуальной является задача разработки и исследования АД, обладающих малой погрешностью преобразования амплитуды синусоидального напряжения в постоянное напряжение.

Структурная схема амплитудного детектора для измерителей параметров резонансных электрических цепей

АД, входящие в состав измерительных установок для определения параметров резонансных электрических цепей, должны обеспечивать преобразование в постоянное напряжение амплитуды выходного синусоидального напряжения измерительных цепей в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц и в диапазоне амплитуд до 10 В. Относительная погрешность не должна превышать 1–2 % [1].

В работе [2] была предпринята попытка решить такую задачу путем прямого измерения амплитуды синусоидального напряжения с помощью пикового детектора. Была получена относительная погрешность не более ± 1 % в диапазоне частот синусоидального напряжения от 20 до 200 кГц при амплитуде от 5,0 до 10,0 В. Кроме недостаточной ширины рабочей полосы частот для АД на основе пиковых детекторов характерны низкая помехозащищенность и низкое быстродействие.

В данной работе исследуется АД, основанный на измерении среднеквадратичного значения синусоидального напряжения с последующим умножением на коэффициент амплитуды (пик-фактор) $k_a = \sqrt{2} \approx 1,414$. При этом предполагается, что измерительная цепь, преобразующая сопротивление резонансной электрической цепи в напряжение, работает в линейном режиме, не искажая синусоидальной формы напряжения.

Среднеквадратичное значение входного напряжения $u(t)$ описывается выражением

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (1)$$

Непосредственное вычисление среднеквадратичного значения напряжения по формуле (1) с последовательным возведением в квадрат текущего значения входного напряжения, усреднением и извлечением квадратного корня из полученного результата не может обеспечить широкий динамический диапазон измерений при сохранении допустимых погрешностей.

От этого недостатка свободен альтернативный, неявный метод вычисления среднеквадратичного значения напряжения [3, 4], в основе которого лежат следующие соображения.

При возведении в квадрат частей уравнения (1) получается

$$U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt. \quad (2)$$

Интеграл в правой части формулы (2) можно рассматривать как текущее среднее значение квадрата входного напряжения:

$$\overline{u^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt. \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) приобретает вид

$$U^2 = \overline{u^2(t)}. \quad (4)$$

Разделив обе части уравнения (4) на U , получим

$$U = \frac{\overline{u^2(t)}}{U}. \quad (5)$$

В соответствии с уравнением (5) осуществляется неявное вычисление среднеквадратичных значений U входного напряжения $u(t)$, а структура преобразователя среднеквадратичного значения (ПСКЗ) переменного напряжения в постоянное напряжение, основанного на методе неявных вычислений, по сути, представляет собой специализированную аналоговую вычислительную машину, которая решает уравнение (5) в непрерывном режиме.

С целью упрощения аппаратной реализации операции возведения в квадрат и деления сигналов выполняются с использованием логарифмического представления сигналов. Схема такого ПСКЗ приведена на рис. 1:

– прецизионный двухполупериодный выпрямитель находит абсолютное значение входного напряжения $|u(t)|$;

– операция возведения в квадрат выпрямленного входного напряжения заменена на удвоение логарифма этого сигнала: $\text{LOG } u^2(t) = 2 \text{ LOG } u(t)$;

– операция деления напряжений заменена на вычитание логарифма среднеквадратичного выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ из логарифма квадрата выпрямленного входного напряжения:

$$\text{LOG } \frac{u^2(t)}{U_{\text{ВЫХ}}} = 2 \text{ LOG } u(t) - \text{LOG } U_{\text{ВЫХ}};$$

– в экспоненциальном каскаде находится антилогарифм выходного сигнала предыдущего каскада $\frac{u^2(t)}{U_{\text{ВЫХ}}}$;

– фильтр вычисляет среднее значение выходного сигнала $\frac{u^2(t)}{U_{\text{ВЫХ}}}$; выходное напряжение фильтра $U_{\text{ВЫХ}}$ равно искомому среднеквадратичному значению входного напряжения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\overline{u^2(t)}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \sqrt{\overline{u^2(t)}};$$

– цепь обратной связи находит логарифм выходного напряжения фильтра $\text{LOG } U_{\text{ВЫХ}}$ и подает этот сигнал на логарифмический вычитатель, замыкая контур обратной связи для непрерывного решения уравнения (5).

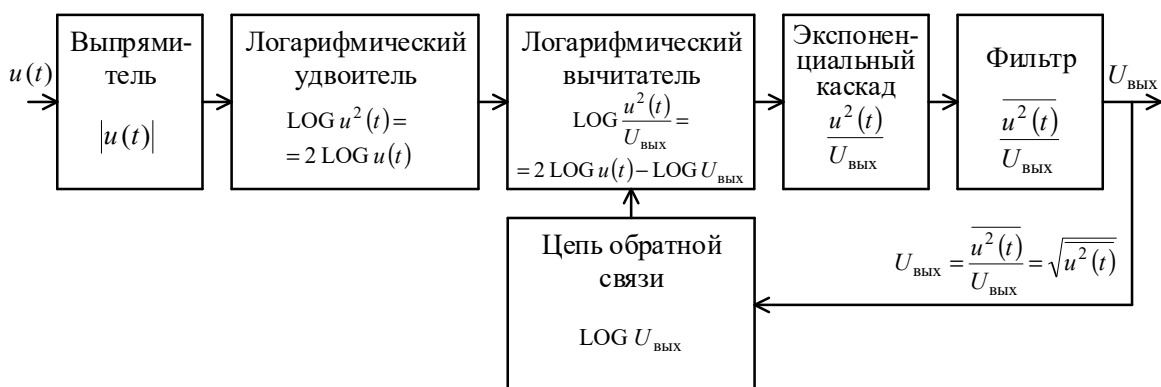


Рис. 1. Структурная схема ПСКЗ с логарифмической обратной связью

Среди серийно выпускаемых измерительных ПСКЗ напряжения с частотой до 1 МГц наиболее высокую точность преобразования обеспечивают микросхемы AD637 [5]. При построении АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей авторами был использован модуль ПСКЗ переменного напряжения в постоянное напряжение на основе AD637 [6]. Структурная схема построенного АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей приведена на рис. 2. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ модуля соответствует среднеквадратичному значению U входного напряжения. В состав модуля, кроме микросхемы AD637, входит

активный фильтр нижних частот (ФНЧ 1 на схеме АД рис. 2) с частотой среза $f_{cp} = 0,05$ Гц и временем установления 20 с, сглаживающий пульсации выходного напряжения ПСКЗ при работе на самых низких (ниже 100 Гц) частотах. С целью сглаживания пульсаций выходного напряжения ПСКЗ при работе на частотах выше 20 кГц применен дополнительный активный фильтр нижних частот (ФНЧ 2) второго порядка с частотой среза $f_{cp} = 2,0$ кГц и временем установления 5 мс, построенный по схеме Саллена – Ки [7–9]. Для получения выходного напряжения $U_{\text{вых. ФНЧ2}}$, равного амплитуде U_m входного синусоидального напряжения установлен коэффициент усиления ФНЧ 2, равный $K = 1,414$. Предусмотрена коррекция аддитивной погрешности.

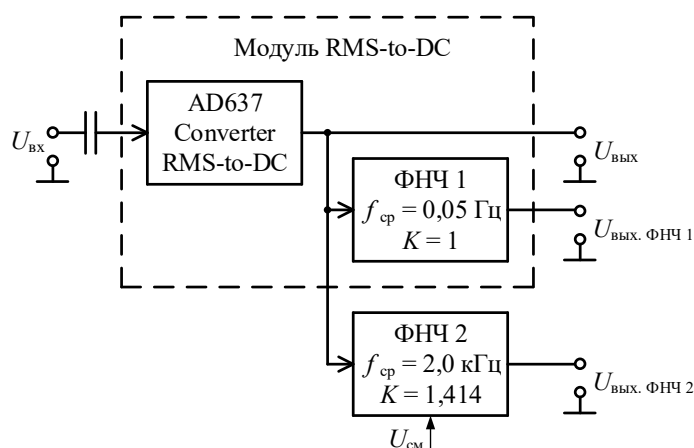


Рис. 2. Структурная схема АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей

На рис. 3 приведены фотографии построенного авторами макета АД и измерительной части стенда для исследования АД.

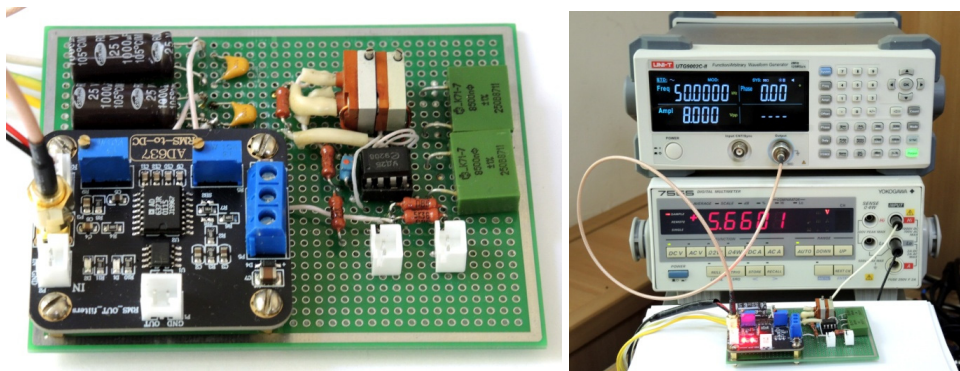


Рис. 3. Макет АД и измерительная часть стенда для исследования АД

Формирование синусоидальных тестовых сигналов осуществляется с помощью DDS генератора UNI-T UTG9002C-II [10] с разрешением по частоте 1 мкГц в диапазоне частот до 2 МГц, с разрешением по амплитуде 1 мВ. Генератор обеспечивает оперативное изменение частоты и амплитуды тестового сигнала. Для измерения постоянного выходного напряжения АД используется цифровой вольтметр YOKOGAWA 7555 [11].

Методика экспериментальных исследований амплитудного детектора

Разработана методика экспериментальных исследований АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей, предусматривающая:

1. Измерение амплитудно-частотных характеристик АД:

1.1. На вход АД с выхода DDS генератора подается синусоидальное напряжение, частота f которого варьируется в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц – по 10 значений частоты в пределах каждой декады; амплитуда U_m входного синусоидального напряжения задается равной: 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 В.

1.2. С помощью цифрового вольтметра измеряются постоянные напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ ФНЧ2}}$ на выходах АД, равные среднеквадратичному значению U и амплитуде U_m входного напряжения.

1.3. По результатам измерений выходных напряжений АД при каждом значении амплитуды входного напряжения U_m на каждой частоте f определяются:

– относительная погрешность преобразования среднеквадратичного значения U входного напряжения в постоянное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$:

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} - U_m / \sqrt{2}}{U_m / \sqrt{2}} \cdot 100 \% ; \quad (6)$$

– относительная погрешность преобразования амплитуды входного напряжения U_m в постоянное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ ФНЧ2}}$:

$$\delta U_{m \text{ ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ ФНЧ2}} - U_m}{U_m} \cdot 100 \% . \quad (7)$$

1.4. Строятся графики зависимостей погрешностей $\delta U_{\text{ВЫХ}}$ и $\delta U_{m \text{ ВЫХ}}$ от частоты f при заданных значениях амплитуды U_m входного напряжения.

2. Измерение амплитудных характеристик АД:

2.1. На вход АД с выхода DDS генератора подается синусоидальное напряжение, амплитуда U_m которого варьируется в диапазоне от 100 мВ до 10 В – по 10 значений амплитуды в пределах каждой декады; частота входного напряжения задается равной: 10; 50; 100; 500 кГц; 1 МГц.

2.2. Измеряются напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ ФНЧ2}}$ на выходах АД.

2.3. По формулам (6) и (7) рассчитываются относительные погрешности преобразования среднеквадратичного значения и амплитуды входного напряжения в постоянные выходные напряжения.

2.4. Строятся графики зависимостей погрешностей $\delta U_{\text{ВЫХ}}$ и $\delta U_{m \text{ ВЫХ}}$ от амплитуды U_m входного напряжения при заданных значениях частоты f .

3. По полученным графикам зависимостей относительных погрешностей $\delta U_{\text{ВЫХ}}$ и $\delta U_{m \text{ ВЫХ}}$ от частоты f и амплитуды U_m входного напряжения определяются границы диапазонов частот и амплитуд напряжения, в которых погрешность не превышает заданного допустимого предела.

В соответствии с изложенной методикой авторами проведены экспериментальные исследования разработанного АД, по результатам которых построены приведенные на рис. 4–7 графики зависимостей погрешностей от частоты f и амплитуды U_m в пределах от минус 2 % до +1 %.

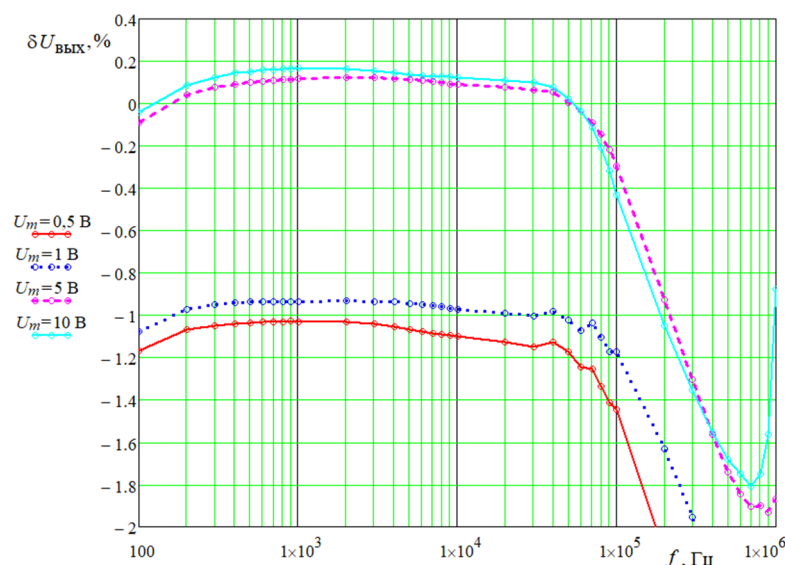


Рис. 4. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования среднеквадратичного значения синусоидального напряжения от частоты

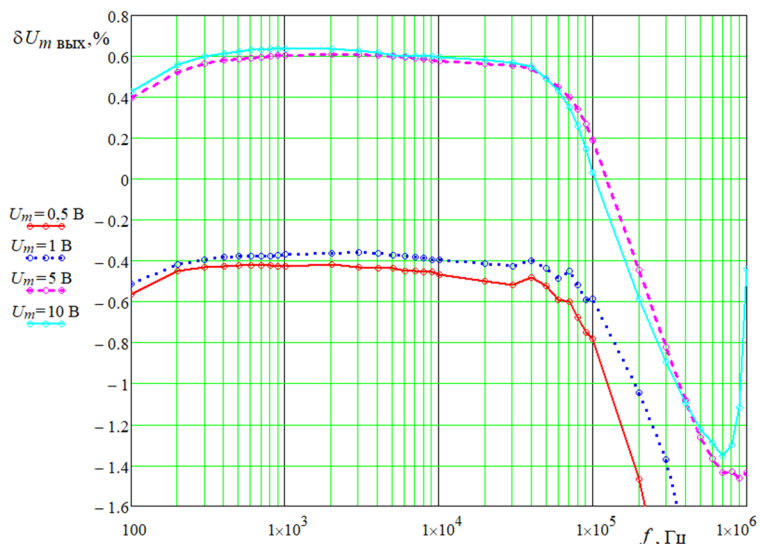


Рис. 5. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования амплитуды синусоидального напряжения от частоты

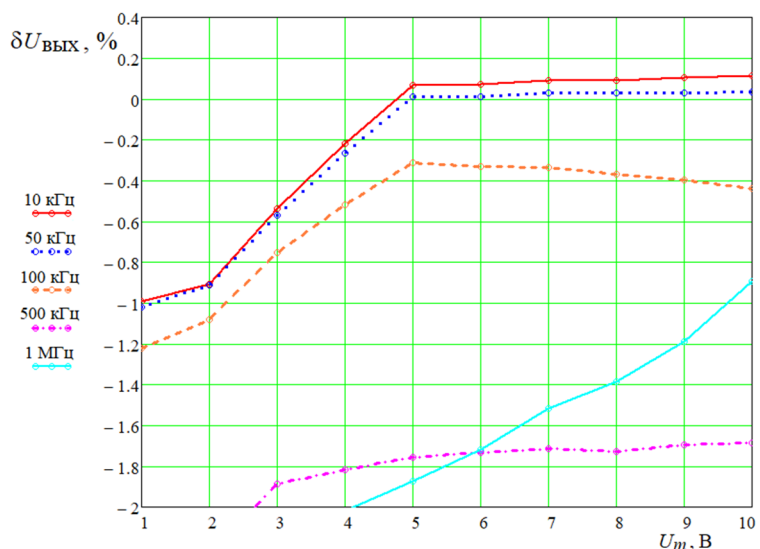


Рис. 6. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования среднеквадратичного значения синусоидального напряжения от его амплитуды

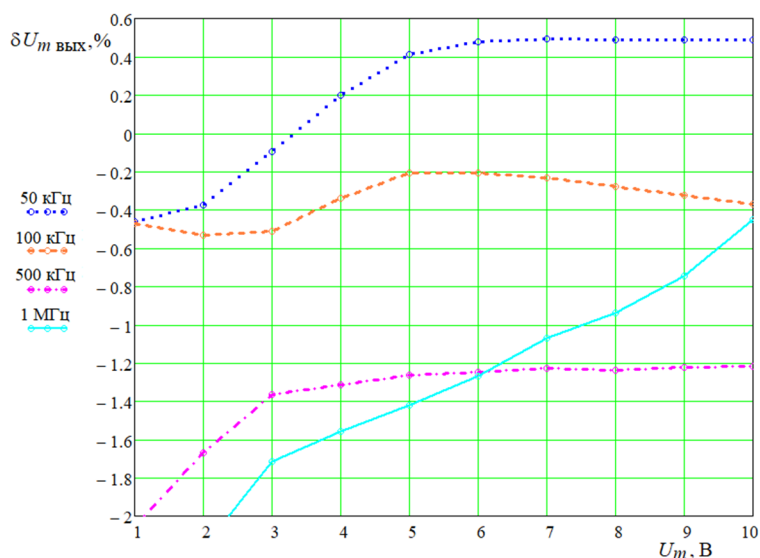


Рис. 7. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования амплитуды синусоидального напряжения от его амплитуды

Заключение

Проведенные авторами исследования подтверждают возможность применения амплитудного детектора, реализующего метод неявных вычислений среднеквадратичных значений переменного напряжения, для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей, например, изделий из пьезоматериалов.

Из приведенных результатов экспериментальных исследований амплитудного детектора следует:

- рекомендуемый диапазон амплитуд входного синусоидального напряжения: от 5 до 10 В;
- в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц относительная погрешность преобразования среднеквадратичного значения напряжения не превышает $\pm 2\%$, а относительная погрешность преобразования амплитуды напряжения не превышает $\pm 1,5\%$ (с учетом коррекции аддитивной погрешности в ФНЧ 2).

Список литературы

1. Светлов А. В. Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92.
2. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Амплитудный детектор для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 31–37.
3. Kitckin C., Counts L. RMS to DC conversion application guide. 2nd ed. Analog Devices, 1986.
4. AN-268: RMS-to-DC Converters Ease Measurement Tasks. URL: <https://archive.org/details/AnalogDevices-2370>
5. Дворников О. В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 1. Преобразователи с экспоненциально-логарифмической обратной связью // Компоненты и технологии. 2004. № 9. С. 62–69.
6. Effective Value Detection Module Peak Detection Signal Conditioning Data Acquisition Peak Voltage AD637 Module. DEVMO DQ_Fme10417.
7. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М. : Бином, 1994. 352 с.
8. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. М. : Додэка-XXI, 2011. 544 с.
9. Filter Design and Analysis. URL: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>
10. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
11. YOKOGAWA 7555 Digital Multimeter. URL: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>

References

1. Svetlov A.V. Nguen N.M. Measurement of parameters of resonant electrical circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences.* 2021;(3):83–92. (In Russ.)
2. Svetlov A.V., Nguen N.M. An amplitude detector for constructing measuring instruments for resonant electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):31–37. (In Russ.)
3. Kitckin C., Counts L. *RMS to DC conversion application guide. 2nd ed.* Analog Devices, 1986.
4. AN-268: *RMS-to-DC Converters Ease Measurement Tasks.* Available at: <https://archive.org/details/AnalogDevices-2370>
5. Dvornikov O.V. Microelectronic converters of alternating voltage to constant voltage in terms of RMS value. Part 1. Exponential-logarithmic feedback converters. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies.* 2004;(9):62–69. (In Russ.)
6. *Effective Value Detection Module Peak Detection Signal Conditioning Data Acquisition Peak Voltage AD637 Module.* DEVMO DQ_Fme10417.
7. Peyton A.Dzh., Volsh V. *Analogovaya elektronika na operatsionnykh usilitelyakh = Analog electronics on operational amplifiers.* Moscow: Binom, 1994:352. (In Russ.)
8. Karter B., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh = Operational amplifiers for everyone.* Moscow: Dodeka-XXI, 2011:544. (In Russ.)
9. *Filter Design and Analysis.* Available at: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>
10. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki = UNI-T UTG9002C-II signal generator. Technical specifications.* (In Russ.). Available at: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/

11. *YOKOGAWA 7555 Digital Multimeter*. Available at: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Вильевич Светлов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Anatoliy V. Svetlov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Сергеевич Колдов

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Aleksandr S. Koldov

Engineer of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
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 20.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 22.07.2024

Принята к публикации/Accepted 12.08.2024