

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.317.73

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-4

*А. В. Светлов, Нгуен Нгок Мань*АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ  
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ  
РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ*A. V. Svetlov, Nguyen Ngoc Manh*AMPLITUDE DETECTOR FOR CONSTRUCTING  
INSTRUMENTS TO MEASURE PARAMETERS  
OF RESONANT ELECTRIC CIRCUITS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Представлены разработка и исследование амплитудного детектора, предназначенного для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей. **Материалы и методы.** Выбрана схема амплитудного детектора, разработаны стенд и методика для экспериментальных исследований детектора. **Результаты.** Выполнены экспериментальные исследования амплитудного детектора в диапазоне амплитуд переменного напряжения от 1,0 до 10,0 В и в диапазоне частот переменного напряжения от 20 до 500 кГц. **Выводы.** Исследуемый амплитудный детектор осуществляет преобразование амплитуды переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение с относительной погрешностью не более  $\pm 1\%$  в диапазоне амплитуд переменного напряжения от 5,0 до 10,0 В и в диапазоне частот переменного напряжения от 20 до 200 кГц. В расширенных диапазонах амплитуд и частот требуется дополнительное оценивание погрешности.

**A b s t r a c t. Background.** Development and research of an amplitude detector designed for constructing instruments to measure parameters of resonant electrical circuits. **Materials and Methods.** A circuit of the amplitude detector has been selected, and a stand and a technique for experimental studies of the detector have been developed. **Results.** Experimental studies of the amplitude detector in the range of alternating voltage amplitudes from 1.0 V to 10.0 V and in the frequency range of alternating voltage from 20 kHz to 500 kHz have been performed. **Conclusions.** The investigated amplitude detector converts the amplitude of alternating voltage of a sinusoidal shape to a constant voltage with a relative error of less than  $\pm 1\%$  in the range of alternating voltage amplitudes from 5.0 V to 10.0 V and in the frequency range of alternating voltage from 20 kHz to 200 kHz. It is required additional error estimation in the extended ranges of amplitudes and frequencies.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** резонансная электрическая цепь, измерение параметров, амплитудный детектор, погрешность.

**К e y w o r d s:** resonant electric circuit, measurement of parameters, amplitude detector, error.

Среди разнообразных средств определения параметров многоэлементных электрических цепей особое место занимают измерительные преобразователи параметров резонансных электрических цепей или физических объектов (например, изделий из пьезоматериалов), представляемых эквивалентными резонансными электрическими схемами, отражающими поведение объектов в частотной области [1–3].

Для описания свойств резонансных электрических цепей необходимо определить параметры элементов (индуктивностей, емкостей, активных сопротивлений), входящих в состав цепи, а также частотные параметры: резонансную частоту и добротность, как отношение резонансной частоты к ширине резонансной кривой на уровне 0,707 от максимального напряжения на выходе измерительной цепи (ИЦ) на резонансной частоте.

Для определения параметров резонансных электрических цепей предложено использовать метод совокупных измерений [4], предполагающий решение системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте.

Методика совокупных измерений параметров резонансных цепей [5] должна предусматривать:

- поиск и измерение резонансной частоты;
- измерение максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте;
- измерение частот, соответствующих расстройке на уровне 0,707 от максимального напряжения на резонансной частоте;
- определение добротности по найденным значениям расстройки и резонансной частоты;
- определение параметров элементов резонансной электрической цепи в результате решения системы уравнений, полученных путем приравнивания математических выражений, описывающих резонансную частоту, добротность и выходное напряжение ИЦ, их измеренным значениям.

В состав средств измерений параметров резонансных электрических цепей должны входить следующие узлы:

1) генератор тестовых сигналов для формирования синусоидальных сигналов с частотой и амплитудой, перестраиваемыми в заданных диапазонах с высокими точностью и разрешением. Этим требованиям в полной мере отвечают программно управляемые DDS-генераторы [6];

2) измерительная цепь (ИЦ) на основе операционного усилителя, осуществляющая преобразование сопротивления исследуемого объекта в напряжение при подаче на вход ИЦ тестового синусоидального сигнала;

3) амплитудный детектор (АД), осуществляющий преобразование амплитуды выходного переменного напряжения ИЦ в постоянное напряжение;

4) средство измерения и регистрации полученного постоянного напряжения – цифровой вольтметр или АЦП, подключенный к компьютеру.

На результирующую погрешность измерителя параметров резонансных цепей оказывают влияние метрологические характеристики всех упомянутых выше узлов, входящих в состав измерителя, но, как показали проведенные авторами исследования, наибольший вклад в результирующую погрешность вносит неидеальность АД.

С целью проверки работоспособности, оптимизации режимов работы и экспериментального определения технических характеристик АД разработан и изготовлен стенд для исследования АД, схема которого приведена на рис. 1.

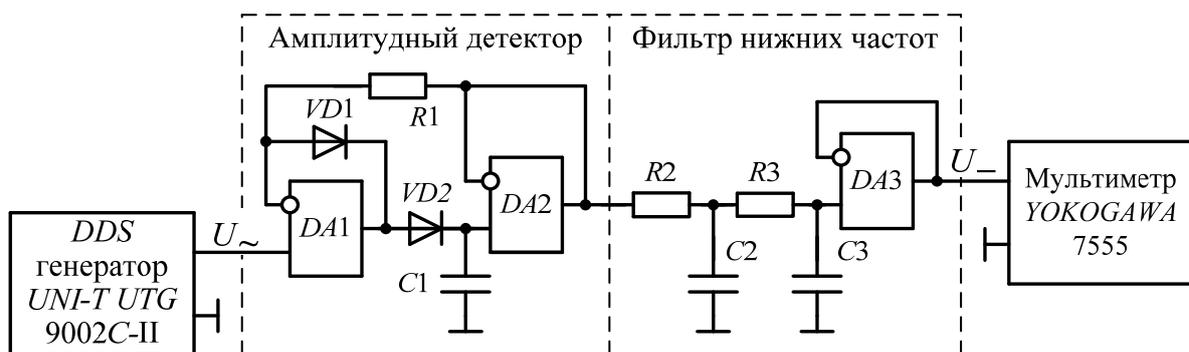


Рис. 1. Схема стенда для исследования АД

В качестве АД использована «классическая» двухкаскадная схема [7, 8]. В цепи обратной связи входного ОУ DA1 включен повторитель напряжения на ОУ DA2, используемый для развязки запоминающего конденсатора C1 и нагрузки. Используются ОУ 544УД2А с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде. Для уменьшения тока утечки запоминающего конденсатора C1 использован полистирольный конденсатор К71-7. Резистор R1 – тонкопленочный резистор С2-33 с низким температурным коэффициентом сопротивления и малым допускаемым отклонением сопротивления. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения АД на его выходе включен фильтр нижних частот.

Для формирования синусоидальных тестовых сигналов используется DDS генератор UNI-T UTG9002C-II [9] с разрешением по частоте 1 мГц в диапазоне частот до 2 МГц и разрешением по амплитуде 1 мВ. Генератор имеет удобные органы управления для оперативного изменения частоты и амплитуды тестового сигнала.

Выходное постоянное напряжение измеряется с помощью цифрового мультиметра YOKOGAWA 7555 [10].

Разработана методика экспериментальных исследований АД, предусматривающая следующие действия:

1. Подготовить стенд для исследования АД к работе. Включить питание мультиметра и DDS генератора без подачи напряжения на его выходной разъем. Установить начальное значение амплитуды тестового синусоидального сигнала 1,0 В и начальное значение частоты 20,0 кГц. Прогреть приборы в течение времени, рекомендуемого Инструкциями по эксплуатации от производителей приборов.

2. Включить питание макета АД, после чего подать на вход АД тестовый синусоидальный сигнал с DDS генератора. Прогреть макет АД в рабочем режиме в течение 20 мин, необходимых для установления теплового режима ОУ 544УД2А в соответствии с рекомендациями [11].

3. С помощью цифрового мультиметра выполнить измерения постоянного выходного напряжения АД  $U_{\text{ВЫХ}}$  при вариации задаваемой DDS генератором амплитуды  $U_{m \text{ ВХ}}$  переменного входного напряжения в диапазоне от 1,0 до 10,0 В с шагом 0,2 В на каждой из частот  $f$  из ряда: 20; 50; 100; 150; 200; 300; 400; 500 кГц. По результатам измерений  $U_{\text{ВЫХ}}$  при каждом значении  $U_{m \text{ ВХ}}$  на каждой частоте  $f$  определить:

– коэффициент преобразования амплитуды переменного входного напряжения  $U_{m \text{ ВХ}}$  в постоянное выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$K = \frac{U_{m \text{ ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}; \quad (1)$$

– относительную погрешность преобразования амплитуды переменного входного напряжения  $U_{m \text{ ВХ}}$  в постоянное выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$\delta = \frac{U_{\text{ВЫХ}} - U_{m \text{ ВХ}}}{U_{m \text{ ВХ}}} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Для каждой частоты  $f$  построить графики амплитудных характеристик (АХ) АД – зависимостей коэффициента  $K$  преобразования амплитуды переменного входного напряжения в постоянное выходное напряжение от амплитуды  $U_{m \text{ ВХ}}$  переменного входного напряжения, а также графики зависимостей погрешности  $\delta$  от амплитуды  $U_{m \text{ ВХ}}$ .

4. Выполнить измерения постоянного выходного напряжения АД  $U_{\text{ВЫХ}}$  при вариации задаваемой DDS генератором частоты  $f$  переменного входного напряжения в диапазоне от 20 до 500 кГц с шагом 10 кГц при следующих значениях амплитуды  $U_{m \text{ ВХ}}$  переменного входного напряжения: 1,0; 2,0; 5; 10 В. По результатам измерений  $U_{\text{ВЫХ}}$  при каждом значении частоты  $f$  и каждом выбранном значении амплитуды  $U_{m \text{ ВХ}}$  определить значения коэффициента  $K$  и относительной погрешности  $\delta$  по формулам (1) и (2). Построить графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) АД – зависимостей коэффициента  $K$  от частоты  $f$  переменного входного напряжения, а также графики зависимостей погрешности  $\delta$  от частоты  $f$ .

В соответствии с изложенной методикой проведены экспериментальные исследования разработанного АД, по результатам которых построены АХ на заданных частотах  $f$  и АЧХ при заданных амплитудах  $U_{m\text{вх}}$ , а также графики зависимостей относительных погрешностей  $\delta$  АХ и  $\delta$  АЧХ от амплитуды и частоты в заданных диапазонах.

В качестве примера на рис. 2 приведены графики зависимостей относительной погрешности  $\delta$  АХ от амплитуды  $U_{m\text{вх}}$  в диапазоне от 1 до 10 В на частотах от 20 до 500 кГц.

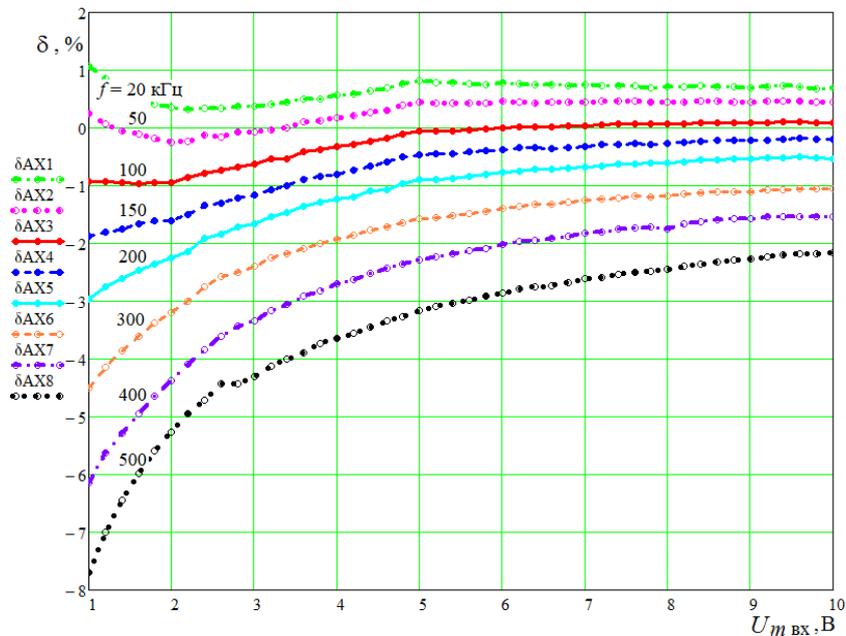


Рис. 2. Графики зависимостей относительной погрешности  $\delta$  АХ от амплитуды  $U_{m\text{вх}}$  в диапазоне от 1 до 10 В

Из приведенных графиков видно, что погрешность не более  $\pm 1\%$  может быть обеспечена в диапазоне частот от 20 до 200 кГц и в диапазоне амплитуд от 5 до 10 В. Графики в этих диапазонах приведены на рис. 3.

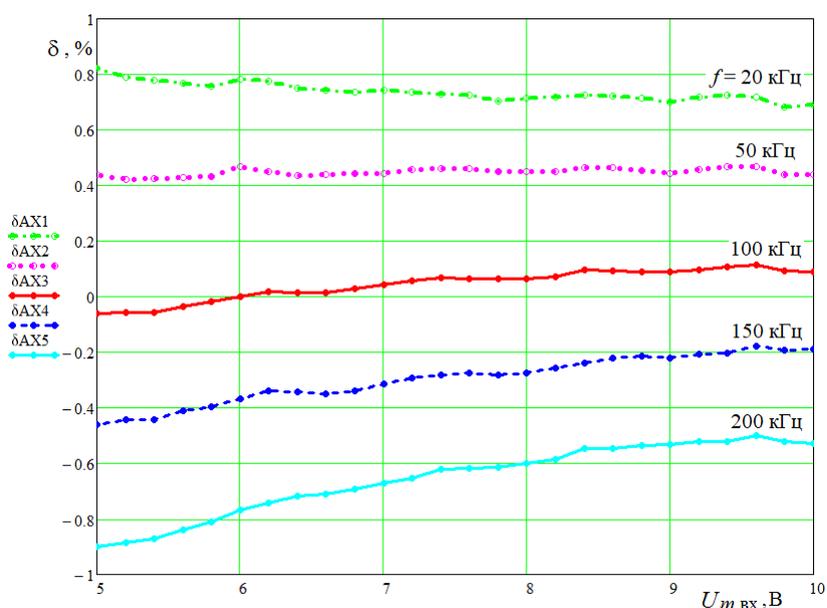


Рис. 3. Графики зависимостей относительной погрешности  $\delta$  АХ от  $U_{m\text{вх}}$  в диапазонах амплитуд от 5 до 10 В и частот от 20 до 200 кГц

Пример графиков зависимостей  $\delta$  АЧХ от частоты приведен на рис. 4.

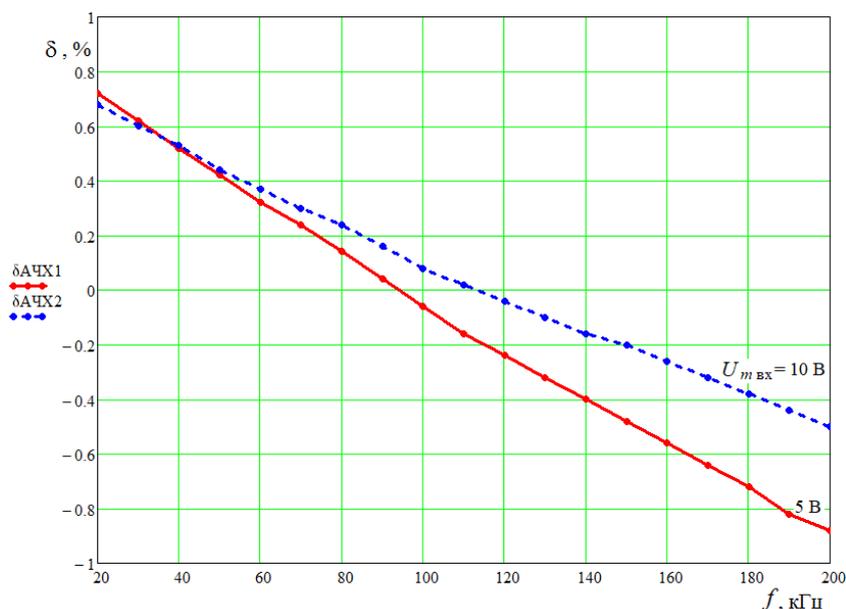


Рис. 4. Графики зависимостей относительной погрешности  $\delta$  АЧХ от частоты в диапазоне частот от 20 до 200 кГц при амплитудах 5 и 10 В

Экспериментально подтверждена возможность расширения диапазона преобразуемых амплитуд  $U_{m\text{вх}}$  до 12,0 В, но для оценивания получаемой погрешности требуются дополнительные исследования с применением аттестованного оборудования.

### Заключение

По результатам выполненных экспериментальных исследований с применением промышленных средств измерений можно сделать следующие выводы о технических характеристиках разработанного АД:

1. АД осуществляет преобразование амплитуды переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение с относительной погрешностью не более  $\pm 1\%$  в диапазонах:

- амплитуд переменного напряжения от 5,0 до 10,0 В;
- частот переменного напряжения от 20 до 200 кГц.

В указанных диапазонах амплитуд и частот переменного напряжения разработанный АД может использоваться при совокупных измерениях параметров резонансных электрических цепей путем решения системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности исследуемой резонансной цепи и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте.

2. АД осуществляет преобразование амплитуды переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение с ненормируемой (оцениваемой по результатам экспериментальных исследований действующего макета АД) погрешностью в расширенных диапазонах:

- амплитуд переменного напряжения от 1,0 до 12,0 В;
- частот переменного напряжения от 20 до 500 кГц.

В указанных диапазонах амплитуд и частот переменного напряжения разработанный АД может использоваться только для сравнительного оценивания амплитуд при поиске и измерении резонансной частоты исследуемой цепи.

### Библиографический список

1. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.

3. Чураков, П. П. Инвариантные измерители параметров катушек индуктивности / П. П. Чураков, Б. Л. Свистунов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. – 180 с.
4. Князьков, А. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей / А. В. Князьков, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 3 (25). – С. 69–78.
5. Колдов, А. С. Методика совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.) : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – Т. 1. – С. 145–149.
6. Murphy, E. Direct Digital Synthesis (DDS). Controls Waveforms in Test, Measurement, and Communications / E. Murphy, C. Slattery // Analog Dialogue 39-08, August 2005. – URL: [http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds\\_apps.pdf](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf).
7. Алексенко, А. Г. Применение прецизионных аналоговых ИС / А. Г. Алексенко, Е. А. Коломбет, Г. И. Стародуб. – Москва : Советское радио, 1980. – 224 с.
8. Пейтон, А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Дж. Пейтон, В. Волш. – Москва : Бинум, 1994. – 352 с.
9. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: [https://supereyes.ru/catalog/waveform\\_generator/uni\\_t\\_utg9002c\\_ii/](https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/).
10. YOKOGAWA 7555 Digital Multimeter. – URL: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>.
11. Мониторинг частотных параметров операционных усилителей при работе в нестационарных тепловых режимах / Д. В. Артамонов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 37–43.

#### References

1. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opreделение parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multielement two-terminal]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Fundamentals of invariant transformation of electric circuit parameters]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 216 p. [In Russian]
3. Churakov P. P., Svistunov B. L. *Invariantnye izmeriteli parametrov katushek induktivnosti* [Invariant measuring the parameters of inductors]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 1998, 180 p. [In Russian]
4. Knyaz'kov A. V., Koldov A. S., Rodionova N. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 69–78. [In Russian]
5. Koldov A. S., Svetlov A. V. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t.* [The problems of automation and control in technical systems : collection of articles on materials of the XXXIII Intern. scientific and technical conf. (Penza, may 22–23, 2019): in 2 vols.]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, vol. 1, pp. 145–149. [In Russian]
6. Murphy E., Slattery C. *Analog Dialogue 39-08, August 2005*. Available at: [http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds\\_apps.pdf](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf).
7. Aleksenko A. G., Kolombet E. A., Starodub G. I. *Primenenie pretsizionnykh analogovykh IS* [Application of precision analog ICS]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 224 p. [In Russian]
8. Peyton A. Dzh., Volsh V. *Analogovaya elektronika na operatsionnykh usilitelyakh* [Analog electronics on operating amplifiers]. Moscow: Binom, 1994, 352 p. [In Russian]
9. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki* [Uni-T UTG9002C-II signal generator. Technical parameters]. Available at: [https://supereyes.ru/catalog/waveform\\_generator/uni\\_t\\_utg9002c\\_ii/](https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/). [In Russian]
10. YOKOGAWA 7555 *Digital Multimeter*. Available at: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>.
11. Artamonov D. V., Knyaz'kov A. V., Parshukov M. Yu., Sapunov E. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 4 (22), pp. 37–43. [In Russian]

#### Светлов Анатолий Вильевич

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

#### Svetlov Anatoliy Vil'evich

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

**Нгуен Нгок Мань**

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Nguyen Ngoc Manh**

postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Светлов, А. В. Амплитудный детектор для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей / А. В. Светлов, Нгуен Нгок Мань // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 31–37. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-4.