

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ДОБРОТНОСТИ

А. В. Светлов¹, Нгок Мань Нгуен²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка методики определения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности. *Материалы и методы.* Предложенная методика предусматривает измерение резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи с последующим решением системы уравнений, связывающих измеренные параметры с индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением электрической цепи. *Результаты.* Приведены расчетные соотношения, рассмотрен пример определения параметров конкретной трехэлементной резонансной электрической цепи и оценивания составляющей погрешности, обусловленной неидеальностью операционного усилителя, на основе которого построена измерительная цепь. *Выводы.* Применение предложенной методики определения параметров резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности позволило избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения измерительной цепи. По результатам моделирования составляющая погрешности, обусловленная неидеальностью элементной базы измерительной цепи, не превышает 1 %.

Ключевые слова: электрическая цепь, резонансная частота, добротность, параметры элементов цепи, измерение, погрешность

Для цитирования: Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 39–47. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-5

DETERMINATION OF RESONANT ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETERS BASED ON RESONANT FREQUENCY AND QUALITY FACTOR MEASUREMENTS

A.V. Svetlov¹, Ngoc Manh Nguyen²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The aim of the article is to develop a methodology to determine parameters of three-element resonant electric circuits based on resonant frequency and quality factor measurements. *Materials and methods.* The proposed technique provides for the measurement of resonant frequency, quality factor, and maximum voltage at the output of a measuring circuit with subsequent solution of a system of equations connecting the measured parameters

with inductance, capacitance, and active resistance of the electrical circuit. *Results.* Calculated ratios are given, and an example of determining the parameters of a specific three-element resonant electric circuit, and estimating the error component due to imperfection of an operational amplifier, with a measuring circuit built thereon, is considered. *Conclusions.* An application of the proposed technique to determine the parameters of resonant electrical circuits based on resonant frequency and quality factor measurements made it possible to get rid of errors in analogue conversions of the output voltage of the measuring circuit. According to the simulation results, the error component does not exceed 1 % due to imperfection of the element base of the measuring circuit.

Keywords: electrical circuit, resonant frequency, quality factor, parameters of circuit elements, measurement, error

For citation: Svetlov A.V., Nguyen N.M. Determination of resonant electrical circuit parameters based on resonant frequency and quality factor measurements. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):39–47. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-5

Задача измерения параметров объектов, представляемых эквивалентными электрическими схемами в виде резонансных электрических цепей (ЭЦ), фактически включает в себя две задачи [1]:

- определение частотных параметров ЭЦ: резонансной частоты и добротности;
- определение электрических параметров ЭЦ: активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления ЭЦ в полосе рабочих частот или эквивалентных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений в соответствии с принятой для измерения эквивалентной электрической схемой объекта исследования.

Традиционно применяемые способы определения электрических параметров ЭЦ [2–4] предполагают:

- преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение с помощью специально создаваемой для этого измерительной цепи (ИЦ), на вход которой подается требуемый тестовый сигнал;

- выполнение последовательности аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ с целью раздельного получения информации о искомым электрических параметрах ЭЦ.

В результате последовательного выполнения ряда аналоговых преобразований накапливается значительная погрешность преобразования [5]. Избежать этого можно, оставив только одну аналоговую процедуру – преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение при вариации частоты тестового сигнала с целью определения резонансной частоты и добротности, а электрические параметры ЭЦ предложено определять программным способом – путем вычисления по найденным значениям частотных параметров ЭЦ.

В соответствии с методом совокупных измерений составляется и решается система уравнений, связывающих искомые электрические параметры ЭЦ с измеренными значениями резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе ИЦ [6].

Методику совокупных измерений параметров резонансных ЭЦ рассмотрим на примере трехэлементной ЭЦ, включенной в состав ИЦ, построенной на операционном усилителе (ОУ) с опорным сопротивлением R_0 во входной цепи и исследуемой ЭЦ в цепи отрицательной обратной связи (рис. 1).

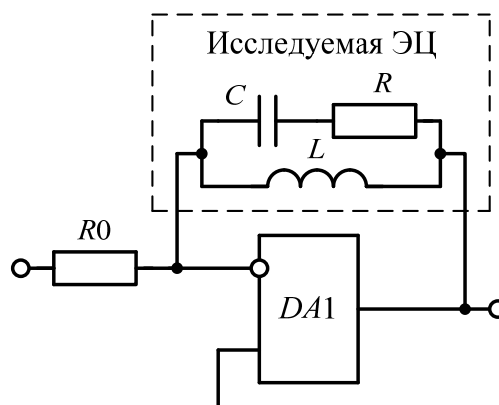


Рис. 1. ИЦ для измерения параметров резонансных ЭЦ

Для формирования подаваемого на вход ИЦ тестового синусоидального напряжения используется генератор прямого цифрового синтеза (DDS) UNI-T UTG9002C-II [7]. Амплитуда синусоидального выходного напряжения ИЦ с помощью амплитудного детектора [8] преобразуется в постоянное напряжение, измеряемое цифровым вольтметром YOKOGAWA 7555 [9].

В процессе поиска резонансной частоты ЭЦ оператор дискретно перестраивает частоту выходного сигнала DDS-генератора до тех пор, пока амплитуда выходного напряжения ИЦ не достигнет максимального значения. По мере приближения к резонансу уменьшается шаг перестройки частоты, а также уменьшается амплитуда тестового сигнала, чтобы не превышать максимального рекомендованного значения входного напряжения амплитудного детектора. Регистрируются найденные значения резонансной частоты f_0 и максимального выходного напряжения ИЦ U_{m0} на резонансной частоте.

С целью определения добротности ЭЦ находят значения частоты f' ниже резонансной частоты f_0 и частоты f'' выше резонансной частоты, при которых амплитуда выходного напряжения равна $U' = 0,707 U_{m0}$. Добротность ЭЦ определяется по формуле: $Q = f_0 / f'' - f'$.

Электрические параметры ЭЦ (эквивалентные индуктивность L , емкость C , активное сопротивление R) могут быть получены путем решения системы уравнений, связывающих эти параметры ЭЦ с найденными значениями резонансной частоты f_0 , добротности Q и максимального напряжения U_{m0} на выходе ИЦ. Для трехэлементной резонансной ЭЦ, показанной на рис. 1, такие уравнения имеют вид

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC - R^2 C^2}}; \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{\frac{L - R^2 C}{R^2 C}}; \quad (2)$$

$$U_{m0} = \frac{16\pi^4 U_0 f_0^4 L^2 R C^2}{R_0 [(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC)^2 + 4\pi^2 f_0^2 R^2 C^2]}. \quad (3)$$

Система уравнений, решение которой позволяет найти искомые электрические параметры ЭЦ, составляется путем приравнивания выражений (1)–(3) измеренным значениям f_0 , Q , U_{m0} . Для численного решения составленной системы уравнений могут быть использованы любые математические программы, например, MathCAD. Кроме того, авторами методом подстановки получено решение составленной системы уравнений в виде формул следующего вида:

$$R = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{U_0 (Q^2 - 1)^2}; \quad (4)$$

$$L = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{2\pi U_0 f_0 Q (Q^2 - 1)}; \quad (5)$$

$$C = \frac{U_0 (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q (Q^2 + 1)}. \quad (6)$$

Практическую реализацию разработанной методики определения параметров трехэлементных резонансных ЭЦ по результатам измерений резонансной частоты и добротности рассмотрим на примере ЭЦ, включенной в состав ИЦ, показанной на рис. 1, при следующих номинальных значениях параметров элементов: $L_{\text{ном}} = 100$ мГн, $C_{\text{ном}} = 100$ пФ, $R_{\text{ном}} = 1000$ Ом. Номинальные значения частотных параметров в соответствии с (1) и (2): $f_{0 \text{ ном}} = 50,35439$ кГц; $Q_{\text{ном}} = 31,60696$. Сопротивление $R_0 = 10$ кОм. Амплитуда тестового синусоидального напря-

жения $U_0 = 0,5$ В. Задание на моделирование ИЦ в частотной области, составленное в соответствии с правилами языка программы PSpice [10], представлено в виде файла 1.cir:

```

1
V1 1 0 AC 0.5
V2 4 0 15
V3 5 0 -15
R0 1 2 50K
L1 2 3 100E-3
R1 2 6 1K
C1 6 3 100E-12
.LIB d:\W\544UD2.mod
X1 0 2 4 5 3 544UD2
.IC V(3) = 0 V(6) = 0
.AC LIN 10000 40E3 60E3
.PROBE V(3)
.END

```

Макромодель ОУ 544УД2 составлена с помощью программы [11] по измеренным динамическим и типовым статическим параметрам ОУ [12, 13].

В результате моделирования ИЦ получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модели ИЦ $U_m(f)$. На рис. 2 приведен фрагмент графика АЧХ, на котором обозначены все измеряемые параметры выходного напряжения ИЦ: резонансная частота f_0 ; максимальное выходное напряжение ИЦ U_{m0} на резонансной частоте; частоты f' и f'' , при которых амплитуда выходного напряжения равна $U' = 0,707 U_{m0}$. Из показанного на рис. 3 графика АЧХ с более высоким разрешением получены значения: $f_0 = 50,258$ кГц; $U_{m0} = 10,024$ В. Аналогичным образом получены значения: $f' = 49,4727$ кГц; $f'' = 51,0567$ кГц. По результатам моделирования найдено значение добротности: $Q = f_0 / (f'' - f') = 31,7285$, а по формулам (4)–(6) вычислены значения параметров элементов: $R = 998,7009$ Ом; $C = 99,9377$; $L = 100,25$ мГн.

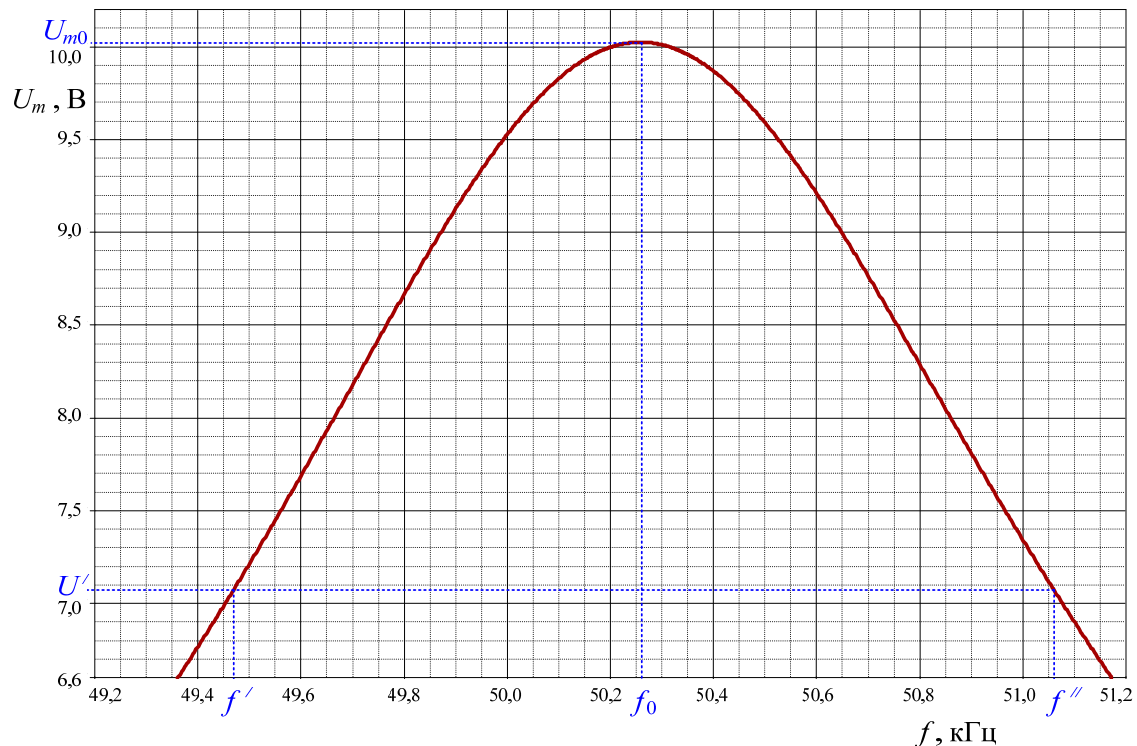


Рис. 2. Фрагмент графика АЧХ модели ИЦ в области частот от f' до f''

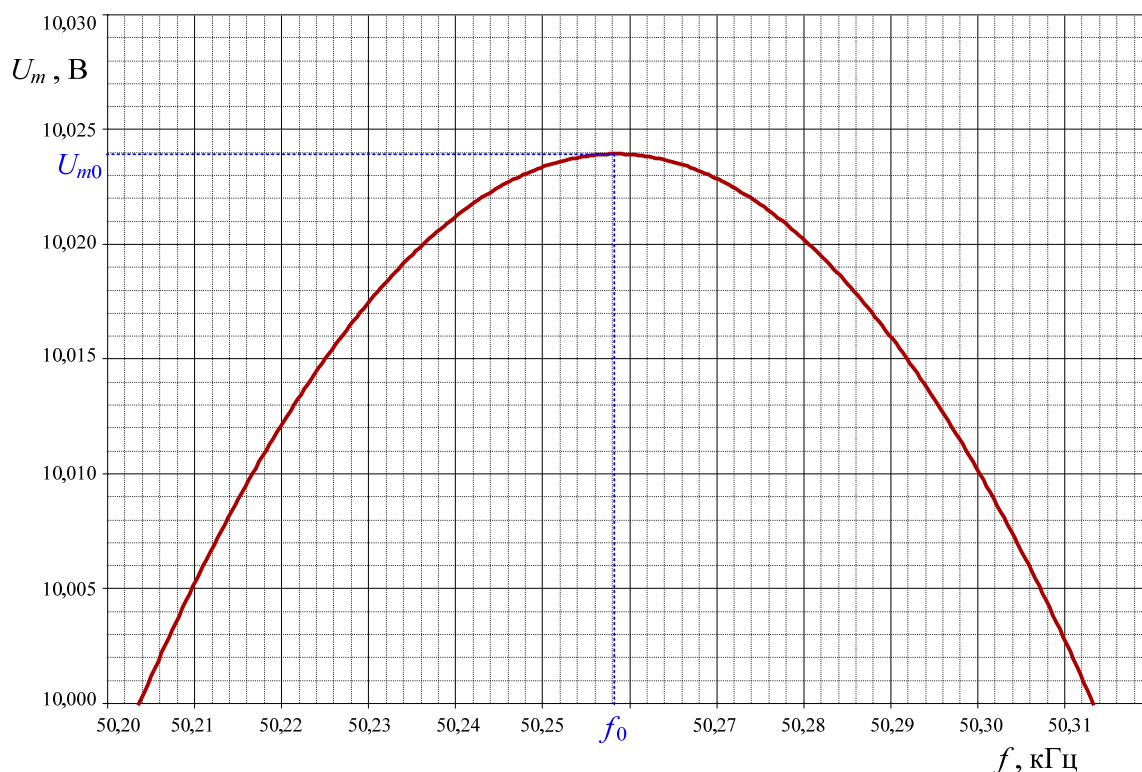


Рис. 3. Фрагмент графика АЧХ модели ИЦ вблизи резонансной частоты f_0

Относительные погрешности определения параметров резонансных ЭЦ, обусловленные неидеальностью ОУ ИЦ, оцениваются путем сопоставления полученных по результатам моделирования значений частотных параметров и параметров элементов ЭЦ с их номинальными значениями:

$$\delta f_0 = \frac{f_0 - f_{0\text{НОМ}}}{f_{0\text{НОМ}}} \cdot 100 \% ; \quad (7)$$

$$\delta Q = \frac{Q - Q_{\text{НОМ}}}{Q_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \% ; \quad (8)$$

$$\delta R = \frac{R - R_{\text{НОМ}}}{R_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \% ; \quad (9)$$

$$\delta L = \frac{L - L_{\text{НОМ}}}{L_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \% ; \quad (10)$$

$$\delta C = \frac{C - C_{\text{НОМ}}}{C_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \% . \quad (11)$$

В рассмотренном примере получены следующие значения погрешностей: $\delta f_0 = -0,19 \%$; $\delta Q = 0,38 \%$; $\delta R = -0,13 \%$; $\delta L = 0,25 \%$; $\delta C = -0,06 \%$.

Данные составляющие погрешности, обусловленные неидеальностью ОУ ИЦ, суммируются с составляющими погрешностей других средств измерений, задействованных в процессе определения параметров резонансных ЭЦ. Погрешности промышленных DDS-генератора [7] и цифрового вольтметра постоянного тока [9] не превышают 0,1 %. Погрешность разработанного авторами статьи амплитудного детектора [8] не превышает 1 %. Результирующая относительная погрешность определения параметров резонансных ЭЦ не должна превышать 1,5–2 % в установленных диапазонах допустимых соотношений измеряемых параметров элементов

ЭЦ. Эти диапазоны можно найти путем моделирования ИЦ при поочередной вариации номинальных значений параметров всех элементов ЭЦ и оценивании получаемой погрешности, которая не должна превышать заданных пределов.

Аналогичным образом могут быть определены параметры трехэлементных резонансных ЭЦ других топологий. В табл. 1 и 2 приведена информация о месте включения исследуемой ЭЦ разных топологий в составе ИЦ (входная цепь ОУ или цепь отрицательной обратной связи ОУ).

Таблица 1

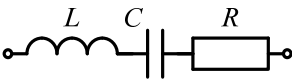
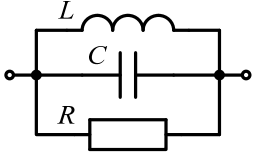
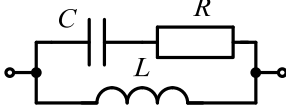
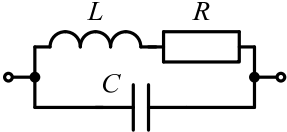
ЭЦ		
Место включения	Входная цепь ОУ	Цепь отрицательной обратной связи ОУ
Система уравнений	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L}{R^2C}} = Q; \\ \frac{U_0 R_0}{R} = U_{m0}. \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{R^2C}{L}} = Q; \\ \frac{U_0 R}{R_0} = U_{m0}. \end{cases}$
Решение для R	$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}}$	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0}$
Решение для C	$C = \frac{U_{m0}}{2\pi U_0 f_0 R_0 Q}$	$C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$
Решение для L	$L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0}$	$L = \frac{U_{m0} R_0}{2\pi U_0 f_0 Q}$

Таблица 2

ЭЦ		
Место включения	Цепь отрицательной обратной связи ОУ	Цепь отрицательной обратной связи ОУ
Система уравнений	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC - R^2C}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L - R^2C}{R^2C}} = Q; \\ \frac{16\pi^4 U_0 f_0^4 L^2 R C^2}{R_0 [(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC)^2 + 4\pi^2 f_0^2 R^2 C^2]} = U_{m0} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi L \sqrt{\frac{L}{C} - R^2}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L - CR^2}{CR^2}} = Q; \\ \frac{U_0 (4\pi^2 f_0^2 L^2 + R^2)}{R_0 R} = U_{m0} \end{cases}$
Решение для R	$R = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{U_0 (Q^2 - 1)^2}$	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0 (Q^2 + 1)}$
Решение для C	$C = \frac{U_0 (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q (Q^2 + 1)}$	$C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$
Решение для L	$L = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{2\pi U_0 f_0 Q (Q^2 - 1)}$	$L = \frac{U_{m0} R_0 Q}{2\pi U_0 f_0 (Q^2 + 1)}$

Критерием выбора места включения исследуемой ЭЦ является наличие обратной связи ОУ по постоянному току. В соответствии с этим критерием только последовательная RCL -цепь не может включаться в цепи отрицательной обратной связи ОУ. В качестве опорных элементов во всех вариантах ИЦ используются активные сопротивления R_0 . Приведены системы уравнений, связывающие искомые параметры R , C , L элементов ЭЦ с измеренными значениями резонансной частоты f_0 , добротности Q и максимального напряжения U_{m0} на выходе ИЦ. Приведены также решения этих систем уравнений в виде формул для вычисления искомого параметров. В табл. 1 приведена информация для определения параметров ЭЦ, образованных последовательным и параллельным соединением трех элементов R , C , L . В табл. 2 – информация для ЭЦ, образованных параллельным соединением двухэлементной последовательной RC - или RL -цепи с другим реактивным элементом L или C .

Проведено моделирование ИЦ для всех топологий ЭЦ, представленных в табл. 1 и 2. Во всех рассмотренных примерах относительные погрешности определения параметров ЭЦ, обусловленные неидеальностью ОУ, не превысили 1%. Экспериментальные исследования описанных в данной работе средств измерений подтвердили реализуемость предложенной методики определения параметров резонансных ЭЦ по результатам измерений резонансной частоты и добротности [14]. Применение метода совокупных измерений для определения параметров резонансных ЭЦ позволило существенно упростить аппаратную часть средств измерений и избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ.

Список литературы

1. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Совокупные измерения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 3. С. 68–77.
2. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
3. Мартяшин А. И., Куликовский К. Л., Куроедов С. К., Орлова Л. В. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
4. Чураков П. П., Свистунов Б. Л. Инвариантные измерители параметров катушек индуктивности. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. 180 с.
5. Колдов А. С. Оценивание погрешностей измерительных преобразователей с последовательным выполнением аналоговых преобразований измеряемых величин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018». Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. С. 20–23.
6. Колдов А. С., Светлов А. В. Методика совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей // 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.
7. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
8. 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.
9. Мультиметры цифровых моделей 7555, 7556, 7561, 7562, 7563. Номер по Госреестру 25784-03: Описание типа СИ. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/25784-03-7555-7556-7561-7562-7563-23811>.
10. PSpice® User's Guide. includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. – Cadence. Product Version 15.7. – July 2006. URL: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>
11. OrCAD Model Editor 9.1webupdate1. 2017. URL: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>
12. Sapunov E. V., Svetlov A. V. Processing the results of measurements of operational amplifier parameters // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: proceedings (21–23 May 2015, Omsk). Omsk, 2015. doi 10.1109/SIBCON.2015.7147326.
13. Паршуков М. Ю., Сапунов Е. В., Светлов А. В. Обработка результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 2. С. 112–123.
14. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Стенд для исследования резонансных электрических цепей // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020»): материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. С. 10–12.

References

1. Svetlov A.V., Nguen N.M. Cumulative measurements of parameters of three-element resonant electric circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2020;(3):68–77. (In Russ.)
2. Kneller V.Yu., Borovskikh L.P. *Opreделение parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov = Determination of parameters of multi-element bipolar.* Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
3. Martyashin A.I., Kulikovskiy K.L., Kuroedov S.K., Orlova L.V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey = Fundamentals of invariant transformation of electrical circuit parameters.* Moscow: Energoatomizdat, 1990:216. (In Russ.)
4. Churakov P.P., Svistunov B.L. *Invariantnye izmeriteli parametrov katushek induktivnosti = Invariant inductance coil parameter meters.* Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 1998:180. (In Russ.)
5. Koldov A.S. Estimation of errors of measuring transducers with sequential execution of analog transformations of measured values. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2018» = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of the International Scientific and Technical conf. "Shlyandinsky readings – 2018".* Penza: Izd-vo PGU, 2018:20–23. (In Russ.)
6. Koldov A.S., Svetlov A.V. Method of cumulative measurements of parameters of resonant electrical circuits. *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. = Problems of automation and control in technical systems : collection of articles based on the materials of XXXIII International Scientific and Technical conf. (Penza, May 22-23, 2019): in 2 vols.* Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:145–149. (In Russ.)
7. *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/
8. Svetlov A.V., Nguen N.M. An amplitude detector for constructing means of measuring parameters of resonant electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):31–37. (In Russ.)
9. *Multimetry tsifrovyykh modeley 7555, 7556, 7561, 7562, 7563. Nomer po Gosreestru 25784-03: Opisaniye tipa SI = Multimeters of digital models 7555, 7556, 7561, 7562, 7563. State Register number 25784-03: Description of the SI type.* (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisaniye/25784-03-7555-7556-7561-7562-7563-23811>
10. *PSPICE® User's Guide. includes PSPICE A/D, PSPICE A/D Basics, and PSPICE. – Cadence. Product Version 15.7. – July 2006.* Available at: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>
11. *OrCAD Model Editor 9.1webupdate1. 2017.* Available at: <https://software.com/windows/apps/orcad-model-editor>
12. Sapunov E.V., Svetlov A.V. Processing the results of measurements of operational amplifier parameters. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: proceedings (21–23 May 2015, Omsk).* Omsk, 2015. doi 10.1109/SIBCON.2015.7147326
13. Parshukov M.Yu., Sapunov E.V., Svetlov A.V. Processing of measurement results of frequency and time parameters of operational amplifiers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2016;(2):112–123. (In Russ.)
14. Svetlov A.V., Nguen N.M. Stand for the study of resonant electrical circuits. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2020»): materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky Readings – 2020") : materials of the XII International scientific and technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:10–12. (In Russ.)

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 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)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 27.05.2021

Принята к публикации/Accepted 28.05.2021