

## СОВОКУПНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Приведено доказательство возможности применения метода совокупных измерений для определения электрических параметров трехэлементных резонансных электрических цепей.

*Материалы и методы.* Представлены разработанные методики, расчетные соотношения, результаты расчетов и моделирования с применением программ MathCAD и PSpice.

*Результаты.* Предложены методика совокупных измерений параметров трехэлементных резонансных электрических цепей, а также методика оценивания погрешностей совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей. В приведенном примере по результатам моделирования получены относительные погрешности определения резонансной частоты, добротности и параметров элементов трехэлементной резонансной цепи, не превышающие  $\pm 1,5\%$ .

*Выводы.* Доказана возможность применения метода совокупных измерений для определения электрических параметров трехэлементных резонансных электрических цепей путем решения системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи при резонансной частоте. Применение метода совокупных измерений для определения параметров резонансных электрических цепей позволяет существенно упростить аппаратную часть средств измерений и избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения измерительной цепи.

**Ключевые слова:** резонансная электрическая цепь, параметры, совокупные измерения, методика, погрешность.

A. V. Svetlov, N. M. Nguyen

## AGGREGATE MEASUREMENT OF THE PARAMETERS OF THREE-ELEMENT RESONANCE ELECTRIC CIRCUITS

### Abstract.

*Background.* Proof of the possibility of applying the method of aggregate measurements to determine the electrical parameters of three-element resonant electric circuits.

*Materials and methods.* The developed methods, calculation ratios, calculation and modeling results using the MathCAD and PSpice programs are presented.

*Results.* A technique is proposed for aggregate measurements of the parameters of three-element resonant electric circuits, as well as a technique for estimating the errors of aggregate measurements of the parameters of resonant electric circuits. In the above example, relative simulation errors of the resonance frequency, quality factor and parameters of the elements of the three-element resonant circuit, not exceeding  $\pm 1.5\%$ , were obtained from the simulation results.

*Conclusions.* The possibility of applying the method of aggregate measurements to determine the electrical parameters of three-element resonant electric circuits by solving a system of equations compiled taking into account the measured values of the resonant frequency, quality factor and maximum voltage at the output of the measuring circuit at the resonant frequency is proved. The use of the method of aggregate measurements to determine the parameters of resonant electric circuits makes it possible to significantly simplify the hardware part of measuring instruments and get rid of the errors in analog transformations of the output voltage of the measuring circuit.

**Keywords:** resonant electric circuit, parameters, aggregate measurements, technique, error.

## Введение

Задача определения параметров резонансных электрических цепей (ЭЦ) может быть отнесена к числу сложных задач измерительной техники, поскольку для описания свойств резонансных ЭЦ требуется определять не только электрические параметры ЭЦ (индуктивность, емкость и активные сопротивления), но и частотные параметры ЭЦ (резонансные частоты и добротности).

Для определения электрических параметров резонансных ЭЦ предложено использовать метод совокупных измерений [1], предполагающий решение системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи (ИЦ) при резонансной частоте [2].

### 1. Применение метода совокупных измерений для определения параметров трехэлементных резонансных ЭЦ

Для определения электрических параметров резонансных ЭЦ методом совокупных измерений необходимо выполнить следующие операции:

- включить исследуемую ЭЦ в состав ИЦ, осуществляющей преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение;
- подать на вход ИЦ тестовые синусоидальные сигналы с частотами, соответствующими характерным точкам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) исследуемой резонансной ЭЦ;
- измерить резонансную частоту, добротность и максимальное напряжение на выходе ИЦ при резонансной частоте;
- составить и решить систему уравнений, связывающих искомые электрические параметры резонансной ЭЦ с измеренными значениями резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе ИЦ, причем число уравнений должно быть равно числу искоемых параметров.

Применение метода совокупных измерений для определения параметров резонансных ЭЦ позволяет существенно упростить аппаратную часть средств измерений и избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ, поскольку выполняется только одна анало-

говая процедура – преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение. Все дальнейшие действия по составлению и решению системы уравнений в соответствии с методом совокупных измерений выполняются программным способом [3].

ИЦ предложено строить на основе операционного усилителя (ОУ) в цепь отрицательной обратной связи которого включается исследуемая резонансная ЭЦ, а во входную цепь – опорное сопротивление  $R_0$ . На рис. 1 в качестве примера показана ИЦ для измерения параметров трехэлементной  $R L C$  резонансной цепи ЭЦ. Такой эквивалентной электрической схемой представляются самые распространенные резонансные объекты – катушки индуктивности, а также параллельные колебательные контуры с потерями.

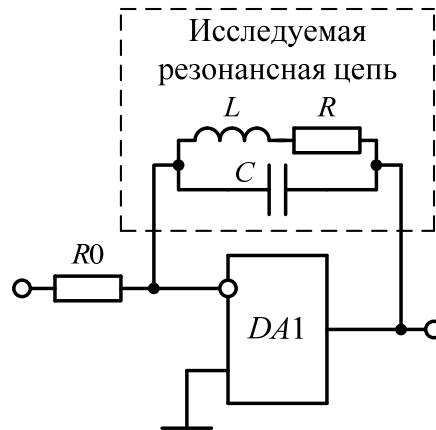


Рис. 1. ИЦ для измерения параметров резонансных электрических цепей

Комплексная проводимость исследуемой резонансной ЭЦ, показанной на рис. 1, описывается выражением

$$Y(j\omega) = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j \left( \omega C - \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \right). \quad (1)$$

Из условия равенства нулю мнимой части (1) резонансная частота равна

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

Добротность вычисляется по формуле

$$Q = \sqrt{\frac{L - C R^2}{C R^2}}. \quad (3)$$

Максимальное напряжение на выходе ИЦ при резонансной частоте равно

$$U_{m0} = \frac{U_0 (R^2 + 4\pi^2 f_0^2 L^2)}{R_0 \cdot R}. \quad (4)$$

Амплитуда выходного напряжения ИЦ при текущей частоте  $f$  описывается выражением

$$U_m(f) = \frac{U_0}{R_0} \cdot \frac{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 f^2 \cdot [L - 4\pi^2 f^2 L^2 C - R^2 C]^2}}{16\pi^4 f^4 L^2 C^2 + 4\pi^2 f^2 C \cdot (R^2 C - 2L) + 1}. \quad (5)$$

## 2. Методика совокупных измерений параметров трехэлементных резонансных ЭЦ

Предложена методика совокупных измерений параметров трехэлементных резонансных электрических цепей, предусматривающая следующие этапы.

Этап 1. Поиск и измерение резонансной частоты и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте.

С выхода DDS-генератора [4] на вход ИЦ подается тестовое синусоидальное напряжение с амплитудой  $U_0$  и частотой, дискретно изменяемой оператором в диапазоне предполагаемых значений резонансной частоты. Осуществляется поиск резонансной частоты  $f_0$  по критерию достижения амплитудой выходного напряжения ИЦ максимального значения. По мере приближения к резонансу уменьшаются шаг перестройки частоты и амплитуда тестового сигнала. Максимальное значение амплитуды выходного напряжения ИЦ  $U_{m0}$  не должно превышать верхнего значения рекомендованного диапазона входных напряжений используемого амплитудного детектора [5]. Регистрируются значения  $f_0$  и  $U_{m0}$ .

Этап 2. Измерение частот, соответствующих расстройке на уровне 0,707 от максимального напряжения на резонансной частоте.

Осуществляется поиск значений частот  $f_1$  и  $f_2$  ниже и выше резонансной частоты  $f_0$ , при которых амплитуда выходного напряжения составляет  $U' = 0,707 U_{m0}$ .

Этап 3. Определение добротности по найденным значениям расстройки и резонансной частоты.

Рассчитываются значения расстройки  $2\Delta f = f_2 - f_1$  и добротности  $Q = f_0 / 2\Delta f$ .

Этап 4. Определение параметров элементов резонансной цепи в результате решения системы уравнений, связывающих искомые параметры трехэлементных резонансных электрических цепей  $L$ ,  $C$ ,  $R$  с измеренными значениями  $f_0$ ,  $U_{m0}$ ,  $Q$ .

Составляется система из трех уравнений, описывающих:

– резонансную частоту:  $f_0 = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{L}{C} - R^2}$  ;

– добротность:  $Q = \sqrt{\frac{L - CR^2}{CR^2}}$  ;

$$\text{– выходное напряжение ИЦ: } U_{m0} = \frac{U_0 (R^2 + 4\pi^2 f_0^2 L^2)}{R_0 \cdot R}.$$

Математические выражения, описывающие эти параметры, приравниваются их измеренным значениям. Из трех полученных уравнений составляется система следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi L} \cdot \sqrt{\frac{L}{C} - R^2} = f_0 ; \\ \sqrt{\frac{L - C \cdot R^2}{C \cdot R^2}} = Q ; \\ \frac{U_0 \cdot (4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L^2 + R^2)}{R_0 \cdot R} = U_{m0} . \end{cases} \quad (6)$$

В результате решения системы уравнений (6) определяются искомые электрические параметры  $L$ ,  $C$ ,  $R$  резонансной цепи. Для численного решения системы уравнений может быть использован любой математический пакет программ, например MathCAD [6]. В результате решения системы уравнений (6) методом подстановки авторами получены выражения для вычисления электрических параметров  $L$ ,  $C$ ,  $R$  катушек индуктивности по измеренным значениям  $f_0$ ,  $Q$  и  $U_{m0}$ :

$$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0 (Q^2 + 1)} ; \quad (7)$$

$$L = \frac{U_{m0} R_0 Q}{2\pi f_0 U_0 (Q^2 + 1)} ; \quad (8)$$

$$C = \frac{U_0 Q}{2\pi f_0 U_{m0} R_0} . \quad (9)$$

Формулы (7)–(9) целесообразно использовать при осуществлении технологического контроля резонансных объектов, например, катушек индуктивности, с программным обеспечением в виде исполняемого *exe*-файла без привлечения математических пакетов (например, MathCAD), требующих больших ресурсов.

### 3. Методика оценивания погрешностей совокупных измерений параметров резонансных ЭЦ

Предложена методика оценивания погрешностей, предусматривающая следующие этапы.

Этап 1. Создание модели ИЦ с реальной передаточной функцией с учетом неидеальности ОУ позволяет в результате моделирования ИЦ в среде PSpice [7, 8] получить АЧХ-зависимость амплитуды выходного напряжения модели ИЦ с реальной передаточной функцией от частоты  $U_m(f)$ .

В качестве практического примера приводятся результаты исследования ИЦ измерителя параметров трехэлементных резонансных ЭЦ (рис. 1) с номинальными значениями параметров:  $L_{\text{ном}} = 100$  мГн,  $C_{\text{ном}} = 100$  пФ,  $R_{\text{ном}} = 1000$  Ом. Исследуемая резонансная ЭЦ включается в цепи отрицательной обратной связи ОУ 544УД2, во входной цепи которого включен опорный резистор  $R_0 = 10$  кОм. Амплитуда тестового синусоидального напряжения  $U_0 = 100$  мВ. При создании модели ИЦ с реальной передаточной функцией используется макромоделль ОУ 544УД2, полученная с помощью программы [9] по измеренным динамическим и типовым статическим параметрам ОУ [10–12]. В результате моделирования в PSpice ИЦ с реальной передаточной функцией получена АЧХ  $U_m(f)$ , фрагмент которой приведен на рис. 2.

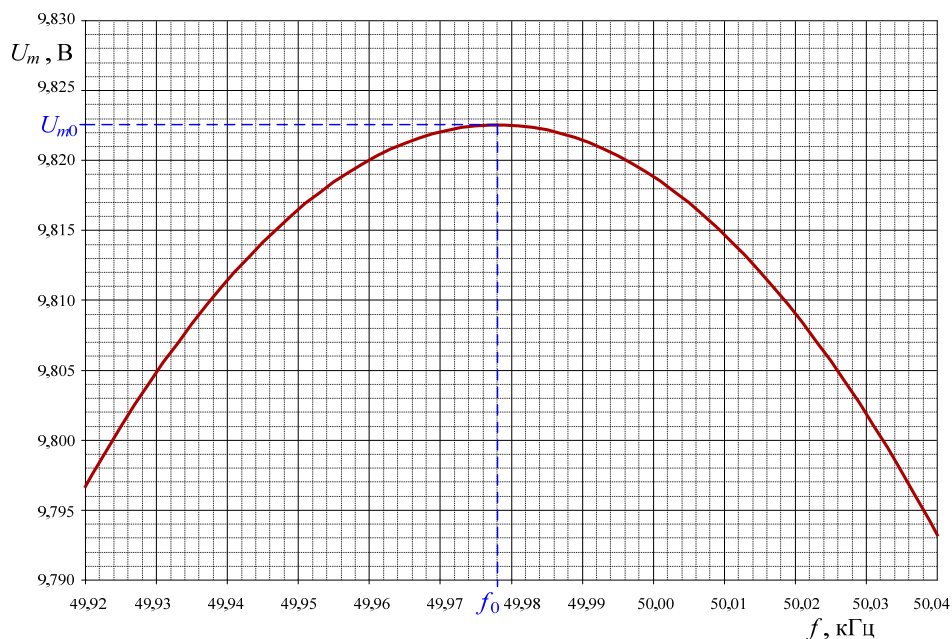


Рис. 2. Фрагмент графика АЧХ модели ИЦ с реальной передаточной функцией вблизи области резонанса

Этап 2. Определение частотных параметров исследуемой ЭЦ: резонансной частоты  $f_0$  и добротности  $Q$ , а также максимального значения амплитуды выходного напряжения ИЦ  $U_{m0}$  по полученной АЧХ для модели ИЦ с реальной передаточной функцией  $U_m(f)$ .

По результатам моделирования определяются:

- резонансная частота  $f_0 = 49,978$  кГц;
- максимальное напряжение на выходе ИЦ  $U_{m0} = 9,8226$  В;
- напряжение  $\sqrt{0,5} \cdot U_{m0} = 0,70711 \cdot U_{m0} = 6,94566$  В;

– частоты  $f_1 = 49,18517$  кГц и  $f_2 = 50,78368$  кГц, соответствующие расстройке на уровне 0,707 от максимального напряжения на резонансной частоте, т.е.  $U_{m0,707}$ ;

– добротность  $Q$  по найденным значениям расстройки  $f_2 - f_1$  и резонансной частоты  $f_0$ :  $Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = 31,2654$ .

Этап 3. Определение искоемых параметров элементов  $L$ ,  $C$ ,  $R$  исследуемой ЭЦ по найденным значениям резонансной частоты, добротности и максимального значения амплитуды выходного напряжения ИЦ  $U_{m0}$  путем решения системы уравнений (6) численными методами или методом подстановки по формулам (7)–(9).

Решение системы уравнений (6) численными методами или методом подстановки дает одинаковые результаты:  $L = 0,09994$  Гн;  $C = 101,363$  пФ;  $R = 1003,8167$  Ом.

Этап 4. Оценивание относительных инструментальных погрешностей  $\delta f_0$  и  $\delta Q$  при определении частотных параметров исследуемой ЭЦ путем сопоставления найденных в результате моделирования значений резонансной частоты  $f_0$  и добротности  $Q$  с номинальными значениями  $f_{0\text{ном}}$  и  $Q_{\text{ном}}$  этих параметров, рассчитанными по формулам (2) и (3) для номинальных значений параметров элементов  $L$ ,  $C$ ,  $R$  исследуемой ЭЦ:

$$\delta f_0 = \frac{f_0 - f_{0\text{ном}}}{f_{0\text{ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (10)$$

$$\delta Q = \frac{Q - Q_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}} \cdot 100 \% . \quad (11)$$

Найденные значения резонансной частоты  $f_0 = 49,978$  кГц и добротности  $Q = 31,2654$  сравниваются с рассчитанными по формулам (2) и (3) номинальными значениями этих параметров:  $f_{0\text{ном}} = 50,30404$  кГц;  $Q_{\text{ном}} = 31,60696$ . По формулам (10) и (11) рассчитываются:  $\delta f_0 = -0,648$  %;  $\delta Q = -1,081$  %.

Этап 5. Оценивание относительных инструментальных погрешностей  $\delta L$ ,  $\delta C$ ,  $\delta R$  при определении параметров элементов исследуемой ЭЦ путем сопоставления найденных в результате моделирования значений параметров элементов  $L$ ,  $C$ ,  $R$  с заданными номинальными значениями  $L_{\text{ном}}$ ,  $C_{\text{ном}}$ ,  $R_{\text{ном}}$  этих параметров:

$$\delta L = \frac{L - L_{\text{ном}}}{L_{\text{ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (12)$$

$$\delta C = \frac{C - C_{\text{ном}}}{C_{\text{ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (13)$$

$$\delta R = \frac{R - R_{\text{НОМ}}}{R_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \% . \quad (14)$$

По формулам (12)–(14) рассчитываются:  $\delta L = -0,055 \%$ ;  $\delta C = 1,363 \%$ ;  $\delta R = 0,382 \%$ .

Этап 6. Анализ погрешности определения параметра каждого элемента ЭЦ при поочередной вариации в установленных диапазонах номинальных значений параметров всех элементов ЭЦ позволяет определить диапазоны допустимых соотношений измеряемых параметров элементов ЭЦ.

Этап 7. Оценивание сходимости результатов экспериментальных исследований измерителей параметров резонансных ЭЦ с результатами математического моделирования позволяет подтвердить корректность предложенной методики совокупных измерений параметров ЭЦ и используемых расчетных соотношений.

Практическая реализация этапов 6 и 7 изложенной методики требует подробного рассмотрения, но в данной статье не представлена ввиду ограниченности объема публикации. Коротко можно отметить: моделирование с помощью программы PSpice, а также экспериментальные исследования [13] показали, что в рассмотренных примерах относительная погрешность определения электрических параметров трехэлементных резонансных ЭЦ по измеренным частотным параметрам не превышает 1,5...2 % в определенных диапазонах соотношений параметров элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . При выходе за пределы этих диапазонов погрешность возрастает. Установлению границ таких диапазонов соотношений параметров элементов ЭЦ посвящены отдельные исследования.

### Заключение

Доказана возможность применения метода совокупных измерений для определения электрических параметров трехэлементных резонансных ЭЦ путем решения системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте. Применение метода совокупных измерений для определения параметров резонансных ЭЦ позволяет существенно упростить аппаратную часть средств измерений и избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ.

Предложены методика совокупных измерений параметров трехэлементных резонансных ЭЦ, а также методика оценивания погрешностей совокупных измерений параметров резонансных ЭЦ. В приведенном примере по результатам моделирования получены относительные погрешности определения резонансной частоты, добротности и параметров элементов трехэлементной резонансной цепи, не превышающие 1,5 %.

### Библиографический список

1. **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.
2. **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.
3. Совокупные измерения электрических параметров пьезокерамических элементов / А. С. Колдов, Е. А. Ломтев, Н. В. Родионова, А. В. Светлов, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 123–135.
  4. 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/).
  5. **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.
  6. **Макаров, Е. Г.** Инженерные расчеты в Mathcad 15. Учебный курс / Е. Г. Макаров. – Санкт-Петербург : Питер, 2011. – 400 с.
  7. 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>.
  8. **Разевиг, В. Д.** Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – Москва : СОЛОН-Р, 2001. – 520 с.
  9. OrCAD Model Editor 9.1webupdate1. – 2017. – URL: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>.
  10. **Паршуков, М. Ю.** Обработка результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 112–123.
  11. **Сапунов, Е. В.** Измерители динамических параметров операционных усилителей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сапунов Е. В. – Пенза, 1998. – 40 с.
  12. **Sapunov, E. V.** Processing the results of measurements of operational amplifier parameters / E. V. Sapunov, A. V. Svetlov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation; 21 May 2015 through 23 May 2015. – Omsk, 2015. – DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147326.2015
  13. **Светлов, А. В.** Стенд для исследования резонансных электрических цепей / А. В. Светлов, Н. М. Нгуен // 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. 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]
2. 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.* [Automation and control problems in technical systems: proceedings of the 33<sup>rd</sup> International scientific and technical conference (Penza, 22-23 of May, 2019): in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, vol. 1, pp. 145–149. [In Russian]
3. Koldov A. S., Lomtev E. A., Rodionova N. V., Svetlov A. V., Tsy-pin B. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2015, no. 2 (34), pp. 123–135. [In Russian]
4. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskije kharakteristiki* [Signal generator UNI-T UTG9002C-II. Specifications]. Available at: [https://supereyes.ru/catalog/waveform\\_generator/uni\\_t\\_utg9002c\\_ii/](https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/). [In Russian]

5. Svetlov A. V., Nguen Ngok Man' *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2020, no. 2 (32), pp. 31–37. [In Russian]
6. Makarov E. G. *Inzhenernye raschety v Mathcad 15. Uchebnyy kurs* [Engineering calculations in Mathcad 15. Training course]. Saint-Petersburg: Piter, 2011, 400 p. [In Russian]
7. *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>.
8. Razevig V. D. *Sistema proektirovaniya OrCAD 9.2*. [Model editor OrCAD 9.2] Moscow: SOLON-R, 2001, 520 p. [In Russian]
9. *OrCAD Model Editor 9.1webupdate1*. 2017. Available at: <https://software.com/windows/apps/orcad-model-editor>.
10. Parshukov M. Yu., Sapunov E. V., Svetlov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 2 (38), pp. 112–123. [In Russian]
11. Sapunov E. V. *Izmeriteli dinamicheskikh parametrov operatsionnykh usiliteley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Measuring instruments of dynamic parameters of operational amplifiers: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Penza, 1998, 40 p. [In Russian]
12. Sapunov E. V., Svetlov A. V. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation; 21 May 2015 through 23 May 2015*. Omsk, 2015. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147326.2015
13. Svetlov A. V., Nguen N. M. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskije chteniya – 2020»): materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Methods, means and technologies for obtaining and processing measurement information (“Shlyandin readings - 2020”): proceedings of the 12<sup>th</sup> International scientific and technical conference]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, pp. 10–12. [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 engineering sciences, professor,  
head of the 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](mailto:rtech@pnzgu.ru)

**Nguyen Ngoc Manh**

Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Светлов, А. В. Совокупные измерения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей / А. В. Светлов, Н. М. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 68–77. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-3-7.