

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2072-3059-2021-3-9

Измерение параметров резонансных электрических цепей

А. В. Светлов¹, Н. М. Нгуен²

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

^{1,2}rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается разработка методик измерений параметров трехэлементных и четырехэлементных резонансных электрических цепей. *Материалы и методы.* Предложены методики совокупных измерений для определения электрических параметров (индуктивностей, емкостей, сопротивлений) трехэлементных и четырехэлементных 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. *Результаты.* Приведены системы уравнений, связывающих искомые электрические параметры цепей с измеренными частотными параметрами, а также решения этих уравнений в виде формул для непосредственного вычисления искомых параметров. *Выводы.* Показана возможность использования метода совокупных измерений для определения электрических параметров трехэлементных и четырехэлементных резонансных электрических цепей.

Ключевые слова: трехэлементные и четырехэлементные резонансные электрические цепи, индуктивности, емкости, сопротивления, измерения

Для цитирования: Светлов А. В., Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92. doi:10.21685/2072-3059-2021-3-9

The measurement of resonant electrical circuit parameters

A.V. Svetlov¹, N.M. Nguyen²

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

^{1,2}rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to develop techniques for measuring three- and four-element resonant electrical circuit parameters. *Materials and methods.* Methods for aggregate measurements to determine electrical parameters (inductance, capacitance, and resistance) of three-element and four-element resonant electrical circuits are proposed. These are based on solving a system of equations, compiled with consideration of resonant frequency, quality factor, and maximum voltage measurements at the output of the measuring circuit at the resonant frequency. *Results.* Systems of equations to link target electrical circuit parameters with the measured frequency parameters are presented. Solutions to these equations being formulas for direct calculation of the required parameters are provided. *Conclusions.* The possibility of using the method for aggregate measurements to determine parameters of three- and four-element resonant electrical circuits is shown.

Keywords: three- and four-element resonant electrical circuits, inductance, capacitance, resistance, measurement

For citation: Svetlov A.V., Nguyen N.M. The measurement of resonant electrical circuit parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie*

Введение

Многие физические объекты представляются эквивалентными электрическими схемами в виде двухполосных резонансных электрических цепей (ЭЦ) [1]. Для определения параметров резонансных ЭЦ предложено использовать метод совокупных измерений [2], предполагающий решение системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансных частот, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи (ИЦ) при резонансной частоте [3, 4]. Измерительные цепи строятся на основе операционных усилителей (ОУ) и осуществляют преобразование сопротивления ЭЦ в напряжение. В данной статье рассмотрены примеры измерения параметров трехэлементных и четырехэлементных резонансных ЭЦ, приведены системы уравнений, связывающих искомые электрические параметры элементов ЭЦ с измеренными частотными параметрами, даны решения этих уравнений для непосредственного вычисления искомых параметров.

1. Измерение параметров трехэлементных резонансных ЭЦ

При измерении параметров трехэлементных резонансных ЭЦ, образованных параллельным соединением емкости C и последовательной RL -цепи, исследуемая ЭЦ включается в цепи отрицательной обратной связи ОУ $DA1$, во входной цепи которого включается опорное сопротивление R_0 (рис. 1).

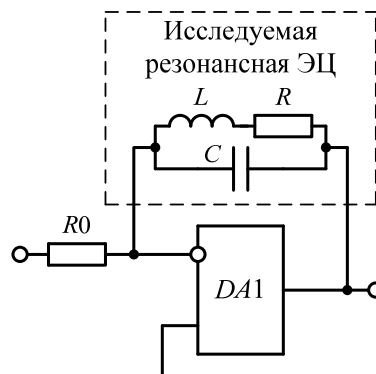


Рис. 1. ИЦ для измерения параметров трехэлементных резонансных ЭЦ

Схема ЭЦ, показанная на рис. 1, это самая распространенная схема резонансных ЭЦ. Такую схему имеют параллельные колебательные контуры с учетом потерь, такой эквивалентной электрической схемой представляются катушки индуктивности с учетом сопротивления потерь и собственной (главным образом межвитковой) емкости [5].

При подаче на вход ИЦ, изображенной на рис. 1, тестового синусоидального сигнала с амплитудой U_0 и частотой f амплитуда выходного напряжения ИЦ описывается выражением

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

На резонансной частоте f_0 амплитуда выходного напряжения ИЦ достигает максимального значения:

$$U_{m0} = \frac{U_0}{R_0 \cdot Y(\omega_0)} = \frac{U_0 \cdot (R^2 + \omega_0^2 L^2)}{R_0 \cdot R} = \frac{U_0 \cdot (R^2 + 4\pi^2 f_0^2 L^2)}{R_0 \cdot R}. \quad (2)$$

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

1. Поиск и измерение резонансной частоты и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте. Для этого с выхода DDS-генератора [6] на вход ИЦ подается тестовое синусоидальное напряжение с амплитудой U_0 и частотой, дискретно изменяемой оператором в диапазоне предполагаемых значений резонансной частоты. Осуществляется итерационный 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. Регистрируются значения f_0 и U_{m0} .

2. Измерение частот, соответствующих расстройке на уровне 0,707 от максимального напряжения на резонансной частоте. Осуществляется поиск значений частот f' и f'' ниже и выше резонансной частоты f_0 , при которых амплитуда выходного напряжения составляет $U' = 0,707 U_{m0}$.

3. Определение добротности по найденным значениям расстройки и резонансной частоты: $Q = f_0 / f'' - f'$.

4. Определение параметров элементов ЭЦ в результате решения системы уравнений, связывающих искомые параметры ЭЦ L , C , R с измеренными значениями f_0 , U_{m0} , Q . Уравнения, входящие в эту систему, получаются путем приравнивания выражений, описывающих резонансную частоту, максимальное напряжение на выходе ИЦ и добротность, их измеренным значениям:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi L} \cdot \sqrt{\frac{L}{C} - R^2} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L - CR^2}{CR^2}} = Q; \\ \frac{U_0 \cdot (4\pi^2 f_0^2 L^2 + R^2)}{R_0 R} = U_{m0}. \end{cases} \quad (3)$$

Для численного решения системы уравнений (3) может быть использован любой математический пакет программ, например MathCAD [7]. Авторами, кроме того, методом подстановки получено решение системы уравнений (3) в виде формул [4] для непосредственного вычисления электрических параметров R , L , C резонансных ЭЦ по измеренным значениям f_0 , Q и U_{m0} :

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

$$L = \frac{U_{m0}R_0Q}{2\pi f_0U_0(Q^2 + 1)}; \quad (5)$$

$$C = \frac{U_0Q}{2\pi f_0U_{m0}R_0}. \quad (6)$$

Аналогично измеряются параметры трехэлементных резонансных ЭЦ вида, показанного на рис. 2.

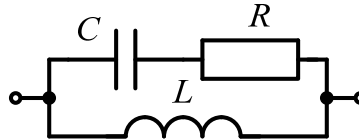


Рис. 2. ЭЦ, образованная параллельным соединением индуктивности L и последовательной RC -цепи

Формулы для непосредственного вычисления электрических параметров R , L , C резонансных ЭЦ (рис. 2) по измеренным значениям f_0 , Q и U_{m0} имеют следующий вид:

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

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

$$C = \frac{U_0 \cdot (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q \cdot (Q^2 + 1)}. \quad (9)$$

2. Измерение параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ

При измерении параметров четырехэлементных резонансных цепей исследуемая ЭЦ включается во входной цепи ОУ $DA1$ (рис. 3), а в цепи отрицательной обратной связи включается опорное сопротивление R_0 .

Схема ЭЦ, показанная на рис. 3, это наиболее часто используемая эквивалентная электрическая схема изделий из пьезоматериалов [8].

При подаче на вход ИЦ тестового синусоидального сигнала с амплитудой U_0 и частотой f амплитуда выходного напряжения ИЦ примет вид:

– на текущей частоте:

$$U_m(f) = \frac{2\pi f U_0 R_0}{(1 - 4\pi^2 f^2 L C_1)^2 + 4\pi^2 f^2 C_1^2 R^2} \cdot \left[4\pi^2 f^2 C_1^4 R^2 + \right.$$

$$+ \left[16\pi^4 f^4 L^2 C_1^2 C_2 + 4\pi^2 f^2 C_1 (C_1 C_2 R^2 - 2LC_2 - LC_1) + C_1 + C_2 \right]^2 \Big]^{1/2}; \quad (10)$$

– на резонансной частоте f_0 (частоте последовательного резонанса) амплитуда выходного напряжения ИЦ достигает максимального значения:

$$U_{m0} = U_0 R_0 \cdot \frac{4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R}{(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC_1)^2 + 4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R^2}. \quad (11)$$

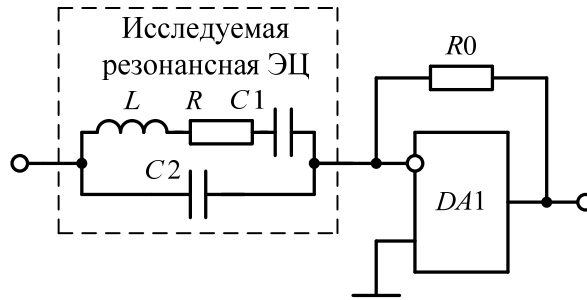


Рис. 3. ИЦ для измерения параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ

Предложенная авторами методика совокупных измерений параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ отличается от аналогичной методики для трехэлементных ЭЦ тем, что добавлен этап итерационного поиска частоты антирезонанса f_1 (параллельного резонанса) по критерию достижения амплитудой выходного напряжения ИЦ минимального значения.

Искомые параметры элементов четырехэлементной резонансной ЭЦ (L , C_1 , C_2 , R) определяются в результате решения системы уравнений, связывающих эти параметры с измеренными значениями резонансной частоты f_0 , частоты антирезонанса f_1 , максимального напряжения на выходе ИЦ U_{m0} и добротности Q :

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC_1}} = f_0; \\ \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC_1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_2}} = f_1; \\ 2\pi L f_0 / R = Q; \\ U_0 R_0 \cdot \frac{4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R}{(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC_1)^2 + 4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R^2} = U_{m0}. \end{cases} \quad (12)$$

Кроме численного решения системы уравнений (12) с применением MathCAD, возможно непосредственное вычисление искомых параметров:

$$C_1 = \frac{U_{m0}}{2\pi f_0 U_0 R_0 Q}; \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{U_{m0} f_0}{2\pi U_0 R_0 Q (f_1^2 - f_0^2)}; \quad (14)$$

$$L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi f_0 U_{m0}}; \quad (15)$$

$$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}}. \quad (16)$$

Недостатком изложенной методики измерений параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ является необходимость итерационного поиска частоты параллельного резонанса (антирезонанса) f_1 , при которой выходное напряжение ИЦ принимает минимальное значение U_{m1} , исчисляемое единицами или даже долями милливольт. Процесс нахождения экстремума амплитуды напряжения U_{m1} сопровождается большими (до нескольких процентов) погрешностями из-за влияния сопоставимых по уровню с полезным сигналом внешних и собственных шумов, электромагнитных помех и наводок по шинам питания. Ошибки в нахождении минимума выходного напряжения ИЦ приводят к погрешностям измерения частоты антирезонанса f_1 , что влечет за собой увеличение погрешностей определения искомых параметров ЭЦ.

С целью повышения точности и сокращения затрат времени на проведение измерительного эксперимента предложено отказаться от итерационного поиска и измерения частоты антирезонанса f_1 , выполняемого в неблагоприятных условиях. В системе уравнений (12), составляемой при совокупных измерениях параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ, предложено заменить уравнение, описывающее частоту антирезонанса f_1 , на уравнение, описывающее амплитуду выходного напряжения ИЦ U_{m2} на некоторой частоте f_2 , отличающейся от резонансных частот f_0 и f_1 . Это уравнение получается путем подстановки в выражение (10) вместо аргумента f значения частоты f_2 и приравнивания получившегося выражения измеренному значению амплитуды выходного напряжения ИЦ U_{m2} на частоте f_2 . В результате система уравнений (12) преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC_1}} = f_0 ; \\ \frac{2\pi f_2 U_0 R_0}{(1 - 4\pi^2 f_2^2 LC_1)^2 + 4\pi^2 f_2^2 C_1^2 R^2} \cdot \left[4\pi^2 f_2^2 C_1^4 R^2 + \left[16\pi^4 f_2^4 L^2 C_1^2 C_2 + \right. \right. \\ \left. \left. + 4\pi^2 f_2^2 C_1 (C_1 C_2 R^2 - 2LC_2 - LC_1) + C_1 + C_2 \right]^2 \right]^{1/2} = U_{m2} ; \\ 2\pi L f_0 / R = Q ; \\ U_0 R_0 \cdot \frac{4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R}{(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC_1)^2 + 4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R^2} = U_{m0} . \end{array} \right. \quad (17)$$

Значение частоты f_2 выбирается из условия $f_1 > f_2 > f_0$ на основе компромисса между требованием малой методической погрешности δC_2 определения параметра C_2 и стремлением увеличить амплитуду напряжения U_{m2} для уменьшения инструментальной погрешности измерения амплитуды этого напряжения. Для выработки рекомендаций по выбору частоты f_2 определены значения амплитуды выходного напряжения ИЦ $U_{m2}(f_2)$ на частотах:

$$f_2 = f_0 + k \cdot (f_1 - f_0), \quad (18)$$

где k – коэффициент, характеризующий отклонение частоты f_2 от резонансной частоты f_0 , отнесенное к разности резонансных частот f_1 и f_0 ;

$$k = \frac{f_2 - f_0}{f_1 - f_0}. \quad (19)$$

Коэффициент k варьировал в пределах от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1. В результате численного решения системы уравнений (17) для каждой пары значений f_2 и $U_m(f_2)$ получены значения параметров элементов ЭЦ и относительные погрешности их определения. Установлено, что от выбора частоты f_2 зависит только погрешность δC_2 определения параметра C_2 .

Рекомендовано выбирать частоту f_2 , исходя из получения амплитуды выходного напряжения ИЦ, равной $U_{m2}(f_2) = (0,015 \dots 0,025) \cdot U_{m0}$, что соответствует диапазону значений коэффициента $k = 0,35 \dots 0,5$.

При таком выборе частоты f_2 обеспечивается малая методическая составляющая погрешности δC_2 , не превышающая $\pm 0,02$ %, и, в то же время, «благоприятный» для измерения диапазон амплитуд выходного напряжения ИЦ. Например, при $U_{m0} = 10$ В напряжение $U_{m2} = 130 \dots 250$ мВ. Инструментальная погрешность измерения амплитуды выходного напряжения ИЦ при этом будет намного меньше погрешности нахождения экстремума амплитуды напряжения в единицы или доли милливольт при поиске и измерении частоты антирезонанса f_1 .

Система уравнений (17) при некоторых соотношениях искомых параметров элементов C_1 , C_2 , L , R становится плохо обусловленной, что затрудняет ее решение численными методами, например, с применением MathCAD. В этих случаях для решения системы уравнений (17) целесообразно использовать сочетание метода подстановки для определения параметров C_1 , L и R путем вычисления по формулам (13), (15) и (16), а для определения параметра C_2 использовать численные методы решения уравнения, описывающего напряжение U_{m2} при частоте f_2 :

$$\frac{2\pi f_2 U_0 R_0}{(1 - 4\pi^2 f_2^2 L C_1)^2 + 4\pi^2 f_2^2 C_1^2 R^2} \left[4\pi^2 f_2^2 C_1^4 R^2 + \left[16\pi^4 f_2^4 L^2 C_1^2 C_2 + \right. \right.$$

$$+4\pi^2 f_2^2 C_1 (C_1 C_2 R^2 - 2LC_2 - LC_1) + C_1 + C_2 \Big]^2 \Big]^{1/2} = U_{m2}. \quad (20)$$

Таким образом, замена измерения частоты антирезонанса f_1 на измерение амплитуды выходного напряжения ИЦ на частоте f_2 , отличной от резонансных частот ЭЦ, позволяет все измерительные процедуры, необходимые для составления системы уравнений, реализующих метод совокупных измерений, выполнить в более благоприятных условиях, с меньшей инструментальной погрешностью.

Заключение

Составлены методики совокупных измерений параметров трех- и четырехэлементных резонансных ЭЦ, позволяющие находить электрические параметры ЭЦ (индуктивности, емкости, сопротивления) по измеренным частотным параметрам (резонансным частотам и добротности) путем решения систем уравнений, связывающих искомые и измеренные параметры.

Для подтверждения достоверности полученных результатов проведены экспериментальные исследования с помощью построенного авторами стенда [9], а также выполнено моделирование измерительных цепей с помощью программы PSpice [10]

Список литературы

1. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
2. Светлов А. В., Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78.
3. Светлов А. В., Колдов А. С. 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.
4. 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.
5. Чураков П. П., Свистунов Б. Л. Инвариантные измерители параметров катушек индуктивности. Пенза : Изд-во ПГУ, 1998. 180 с.
6. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
7. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15. Учебный курс. СПб. : Питер, 2011. 400 с.
8. Земляков В. Л. Методы определения и контроля параметров пьезоэлектрических резонаторов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 5 (106). С. 65–70.
9. 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, 2020. С. 10–12.
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>

References

1. Kneller V.Yu., Borovskikh L.P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov = Determination of parameters of multi-element two-pole*. Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
2. Svetlov A.V., Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V. Aggregate measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Administration. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.)
3. Svetlov A.V., Koldov A.S. The technique of cumulative measurements of the parameters of resonant electric 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. = Automation and control problems in technical systems: proceedings of the 33rd International scientific and engineering conference (Penza, May 22-23, 2019): in 2 volumes*. Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:145–149. (In Russ.)
4. Svetlov A.V., Nguen N.M. Aggregate measurements of parameters of three-element resonant electric circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2020;(3):68–77. (In Russ.)
5. Churakov P.P., Svistunov B.L. *Invariantnye izmeriteli parametrov katushek induktivnosti = Invariant meters of parameters of inductors*. Penza: Izd-vo PGU, 1998:180. (In Russ.)
6. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskije kharakteristiki = Signal generator UNI-T UTG9002C-II. Technical characteristics*. (In Russ.). Available at: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
7. Makarov E.G. *Inzhenernyye raschety v Mathcad 15. Uchebnyy kurs = Engineering calculations in Mathcad 15. Textbook*. Saint Petersburg: Piter, 2011:400. (In Russ.)
8. Zemlyakov V.L. Methods for determining and monitoring the parameters of piezoelectric resonators. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Engineering sciences*. 2010;(5):65–70. (In Russ.)
9. 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 measurement information (“Shlyandinsky readings – 2020”): proceedings of the 12th scientific and engineering conference*. Penza, 2020:10–12. (In Russ.)
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>

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

Нгок Мань Нгуен

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Ngoc Manh Nguyen

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 22.09.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.10.2021

Принята к публикации / Accepted 20.10.2021