

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ РЕЗОНАНСНЫМИ ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫМИ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ СХЕМАМИ

А. В. Светлов¹, Нгок Мань Нгуен²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы – разработка средств измерений параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами. *Материалы и методы.* Используемая методика предусматривает измерение резонансных частот, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи с последующим решением системы уравнений, связывающих измеренные параметры с эквивалентными индуктивностью, емкостями и активным сопротивлением исследуемого объекта. *Результаты.* Приведены расчетные соотношения, рассмотрены примеры определения эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов. *Выводы.* Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения методики совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей для определения частотных и эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами.

Ключевые слова: изделия из пьезоматериалов, четырехэлементная эквивалентная электрическая схема, резонансная частота, добротность, измерение

Для цитирования: Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 69–75. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-8

DETERMINATION OF PIEZOMATERIAL PRODUCTS PARAMETERS EXEMPLIFIED BY FOUR-ELEMENT RESONANT EQUIVALENT CIRCUITS

A. V. Svetlov¹, Ngok Man' Nguen²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to develop tools to measure parameters of piezomaterial products represented by four-element resonant equivalent circuits. *Materials and methods.* The technique used provides for the measurement of resonant frequency, quality factor, and maximum voltage at the measuring circuit output, followed by the solution of a system of equations relating the measured parameters with the equivalent inductance, capacitance, and active resistance of the investigated object. *Results.* Calculation ratios are given, and determination of equivalent electrical parameters of piezomaterial products is exemplified. *Conclusions.* The conducted research has confirmed the feasibility of using the method for aggregate measurements of resonant electrical circuit parameters to determine frequency and equivalent electrical parameters of piezomaterial products represented by four-element resonant equivalent circuits.

Keywords: piezomaterial products, four-element equivalent electrical circuit, resonant frequency, quality factor, measurement

For citation: Svetlov A.V., Nguyen N.M. Determination of piezomaterial products parameters exemplified by four-element resonant equivalent circuits. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):69–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-8

Для описания электрических свойств изделий из пьезоматериалов применяется резонансная четырехэлементная эквивалентная электрическая схема [1–3], представленная на рис. 1, где C_1 , L , R – динамические емкость, индуктивность и сопротивление; C_2 – параллельная емкость.

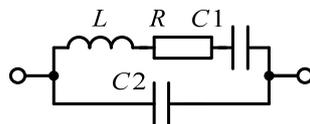


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема изделий из пьезоматериалов

Для определения эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов предлагается использовать методику измерения параметров четырехэлементных резонансных электрических цепей, изложенную в работе [4]. Данная методика построена на основе метода совокупных измерений и предполагает решение систем уравнений, составленных с учетом измеренных значений частотных параметров изделия (частот резонанса и антирезонанса, добротности), а также максимального напряжения на выходе измерительной цепи при резонансной частоте. Полученные системы уравнений решаются относительно искомым эквивалентных электрических параметров изделий (индуктивностей, емкостей, активных сопротивлений), которые в соответствии с принятой эквивалентной электрической схемой объекта отражают поведение объекта в частотной области.

Для измерения параметров изделий из пьезоматериалов разработана, изготовлена и исследована измерительная установка [5] с минимальным числом аналоговых функциональных блоков, позволяющая проводить измерения в диапазоне частот от 20 до 500 кГц.

Структурная схема установки приведена на рис. 2.

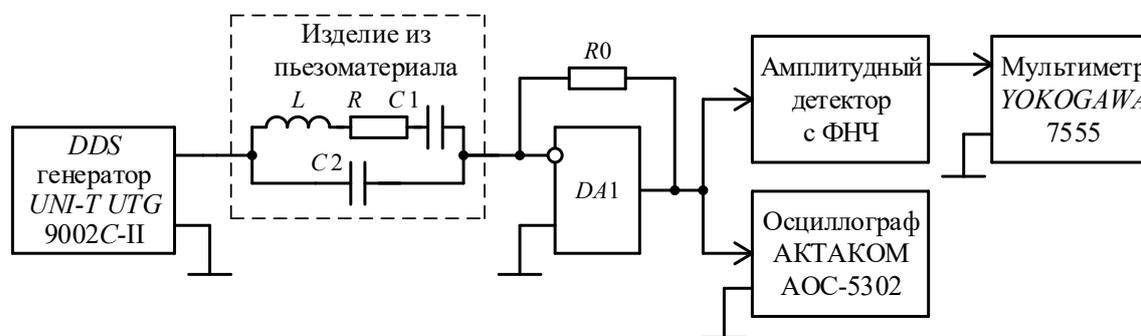


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения параметров изделий из пьезоматериалов

Для построения измерительной цепи (ИЦ) используется отечественный операционный усилитель (ОУ) 544УД2А с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде. При расширении диапазона частот измерительной установки потребуется ОУ с более высоким быстродействием. Исследуемое изделие из пьезоматериала с помощью специального контактирующего устройства включается во входной цепи ОУ с опорным резистором R_0 в цепи его отрицательной обратной связи.

В качестве формирователя синусоидальных тестовых сигналов предложено использовать генератор прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis – DDS) UNI-T UTG9002C-II [6] с высоким разрешением по частоте 1мкГц в диапазоне частот до 2 МГц и достаточным для решения поставленных задач разрешением по амплитуде 1 мВ. Генератор отличается удобными органами управления, позволяющими оперативно изменять частоту и амплитуду тестового сигнала. При расширении диапазона рабочих частот измерительной установки может быть использован DDS генератор UNI-T UTG9005C-II с диапазоном частот до 5 МГц.

Преобразование амплитуды синусоидального выходного напряжения ИЦ в постоянное напряжение осуществляется амплитудным детектором (АД), описанным в работе [7]. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения АД на его выходе включен фильтр нижних частот (ФНЧ).

Для измерения постоянного напряжения на выходе ФНЧ и визуального наблюдения выходного напряжения ОУ используются цифровой мультиметр YOKOGAWA 7555 и цифровой осциллограф АКТАКОМ АОС-5302.

С помощью описанной выше измерительной установки измеряются частотные параметры исследуемого изделия из пьезоматериала: частота последовательного резонанса f_0 , добротность Q и частота параллельного резонанса (антирезонанса) f_1 , а также максимальное напряжение U_{m0} на выходе ИЦ на резонансной частоте. Составляется система уравнений, получаемых путем приравнивания математических выражений [4], описывающих резонансные частоты, добротность и максимальное напряжение на выходе ИЦ их измеренным значениям f_0, f_1, Q, U_{m0} :

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

Решения системы уравнений (1), полученные методом подстановки, в виде формул для вычисления искомых эквивалентных электрических параметров изделия из пьезоматериала L, C_1, C_2, R имеют вид [4]

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

$$C_2 = \frac{U_{m0} f_0}{2\pi U_0 R_0 Q (f_1^2 - f_0^2)} ; \quad (3)$$

$$L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi f_0 U_{m0}} ; \quad (4)$$

$$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}} . \quad (5)$$

Применение метода совокупных измерений позволяет предельно упростить аппаратную часть средства измерения параметров изделий из пьезоматериалов, сократить число последовательно выполняемых аналоговых преобразований измеряемых величин. Предлагаемое техническое решение предполагает только две аналоговые процедуры: преобразование сопротивления исследуемого объекта в напряжение и определение амплитуды синусоидального напряжения на выходе ИЦ на частотах, соответствующих характерным точкам АЧХ этой ИЦ. Все последующие действия по составлению и решению системы уравнений в соответствии с методом совокупных измерений выполняются программным способом. Переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ способствует повышению точности средств измерений за счет предотвращения накопления случайных погрешностей при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований [8].

Полученные в результате моделирования ИЦ и АД относительные погрешности определения параметров элементов четырехэлементной эквивалентной схемы исследуемого изделия из пьезоматериала не превышают $\pm 2\%$.

Рассмотренная методика была применена для исследования ряда образцов пьезоматериалов (10 экземпляров). Во всех измерительных экспериментах с образцами изделий из пьезоматериала в качестве опорного сопротивления R_0 использовался прецизионный резистор С2-29В с сопротивлением $R_0 = 10,2$ кОм. Резонансные частоты у разных образцов изменялись в диапазоне от 180 до 310 кГц. В качестве примера для одного из образцов выполнено подробное измерение АЧХ измерительной цепи (ИЦ). По результатам измерений в программе MathCAD созданы массивы данных в формате: частота – амплитуда выходного напряжения ИЦ. Построены графики фрагментов АЧХ, приведенные на рис. 3.

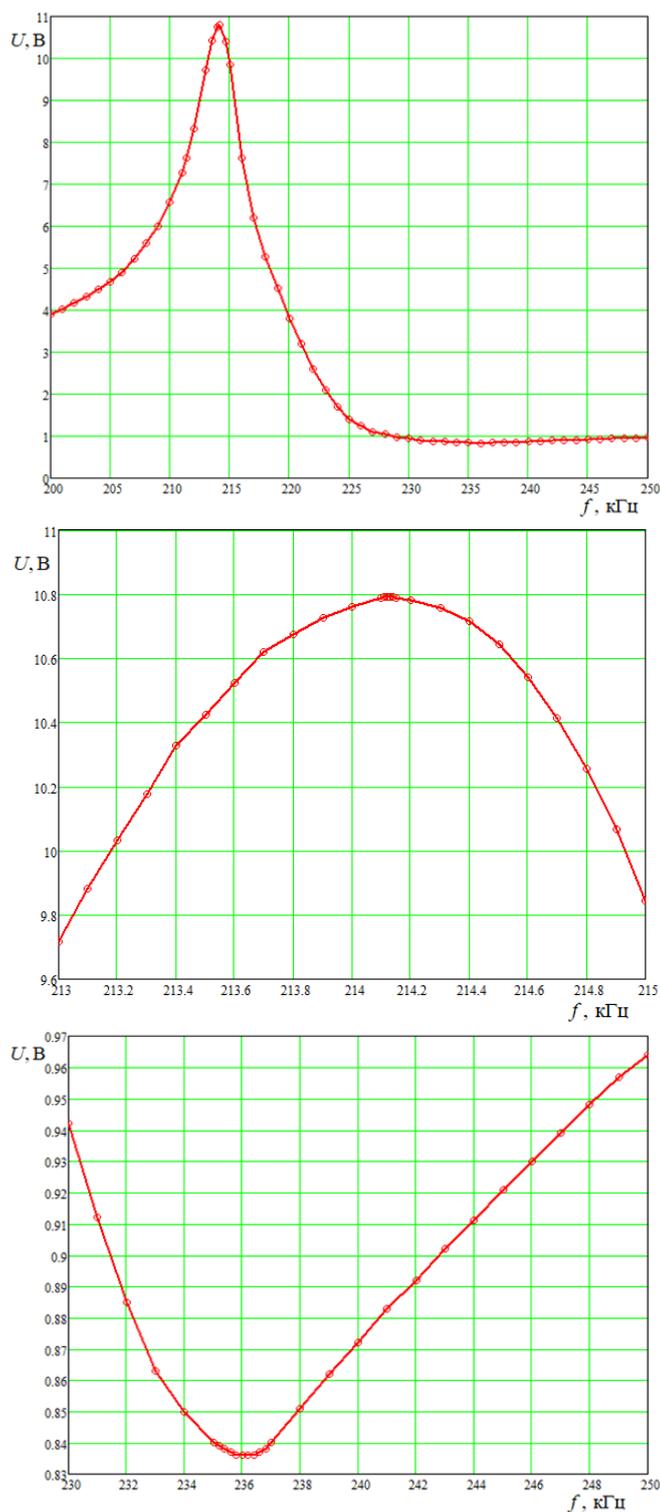


Рис. 3. АЧХ ИЦ с образцом пьезоматериала и фрагменты АЧХ в областях резонанса и антирезонанса

В табл. 1 для трех образцов пьезоматериалов приведены результаты измерений их частотных параметров и вычислений по ним эквивалентных электрических параметров.

Таблица 1

Параметры образцов пьезоматериалов

Показатели	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Результаты измерений частотных параметров			
U_0 , мВ	140,0	110,0	150,0
f_0 , кГц	214,12	287,61	286,13
U_{m0} , В	10,79	8,82	9,550
Q	46,15	75,29	36,47
f_1 , кГц	236,2	300,17	279,51
Результаты вычислений эквивалентных электрических параметров			
C_1 , пФ	121,7	57,8	95,5
C_2 , пФ	561,2	647,4	2104,3
L , мГн	4,54	5,30	3,26
R , Ом	132,3	127,2	160,2

Особенно сложно измерять частотные параметры таких изделий из пьезоматериалов, как кварцевые резонаторы, используемые для построения высокостабильных генераторов электрических колебаний и узкополосных фильтров. Если у пьезоматериалов, предназначенных при построении датчиков давления, актюаторов, элементов гидроакустических антенных решеток, излучателей ультразвуковых колебаний, пьезораспылителей жидкостей и т.п., добротность может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен, то у кварцевых резонаторов добротность достигает нескольких десятков тысяч [9]. Для поиска и измерения частоты последовательного резонанса, а также частот, соответствующих уровню 0,707 от максимальной амплитуды выходного напряжения измерительной цепи на резонансной частоте, требуется очень высокое (до сотых долей герц) разрешение по частоте. Такое высокое разрешение способны обеспечить только DDS генераторы, в частности, используемый автором генератор UNI-T UTG9002C-II [6].

При схемотехническом моделировании электронных схем, в состав которых входят низкочастотные (например, часовые 32,768 кГц) кварцевые резонаторы, следует иметь в виду некоторую «необычность» значений эквивалентных электрических параметров резонатора. Для отображения высокой (десятки тысяч) добротности при низкой резонансной частоте f_0 эквивалентные электрические параметры резонатора, получаемые путем расчета по измеренным частотным параметрам, или заимствованные из библиотек Spice-моделей электронных компонентов программ схемотехнического моделирования, имеют следующие значения (обозначения в соответствии с эквивалентной схемой рис. 1):

- индуктивность L – сотни и тысячи генри;
- емкость C_1 – сотые и тысячные доли пикофард;
- емкость C_2 – единицы пикофард;
- сопротивление R – единицы и десятки килоом.

Эквивалентные электрические схемы с такими параметрами позволяют адекватно отображать частотные характеристики низкочастотных кварцевых резонаторов.

Например, в библиотеке Spice-моделей электронных компонентов программы OrCAD [10] приводится следующая модель часового кварцевого резонатора с частотой последовательного резонанса $f_0 = 32,768$ кГц, добротностью $Q = 81780$, частотой параллельного резонанса $f_1 = 32,8152$ кГц:

```
* 32768 hertz watch crystal, XY cut, series resonant, Q=81780
.subckt QZS32768 1 2
lqz 1 11 lmod 4448.72259
.model lmod ind(tc2 = 8.68e-8)
cs 11 12 5.30279780e-015
rqz 12 2 11.2k
cp 1 2 1.84pf
.ends
```

Автором с помощью измерительной установки были исследованы несколько экземпляров часовых кварцевых резонаторов (см. рис. 2). Подтверждена возможность определения частотных и эквивалентных электрических параметров резонаторов.

Пример: при исследовании одного из кварцевых резонаторов использовались следующие исходные данные:

– сопротивление прецизионного опорного резистора $R_0 = 75,72$ кОм;

– амплитуда тестового синусоидального напряжения $U_0 = 1,40$ В.

Получены следующие результаты измерений:

– частота последовательного резонанса $f_0 = 32,7575$ кГц;

– максимальное напряжение на выходе ИЦ $U_{m0} = 10,380$ В;

– добротность: $Q = 54595,8$;

– частота параллельного резонанса $f_1 = 32,8023$ кГц.

По результатам измерений частотных параметров вычислены эквивалентные электрические параметры кварцевого резонатора:

– емкость $C_1 = 8,714 \cdot 10^{-15}$ Ф;

– емкость $C_2 = 3,184$ пФ;

– индуктивность $L = 2709,0$ Гн;

– сопротивление $R = 10,213$ кОм.

Полученные в результате измерений значения параметров часового кварцевого резонатора соответствуют типовым значениям параметров резонаторов данного типа [10, 11].

В качестве заключения можно отметить, что проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения методики совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей для определения частотных и эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов [4], представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами.

Список литературы

1. Головин В. А., Каплунов И. А., Малышкина О. В. [и др.]. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М. : Техносфера, 2013. 272 с.
2. Пьезоэлектрические резонаторы : справочник / под ред. П. Е. Кандыбы, П. Г. Позднякова. М. : Радио и связь, 1992. 392 с.
3. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрических резонаторов. АО Пьезо – Производство кварцевых генераторов и резонаторов. 2021. URL: https://www.oaopiezo.com/theory_6.html
4. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92.
5. 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.
6. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
7. 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.
8. 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.
9. Справочный материал по пьезотехнике. Добротность пьезоэлектрических резонаторов. АО Пьезо – Производство кварцевых генераторов и резонаторов. 2021. URL: https://www.oaopiezo.com/theory_8.html
10. 32768 hertz watch crystal. Library of quartz crystals. Copyright OrCAD, Inc. 1998 All Rights Reserved. URL: <http://robustdesignconcepts.com/-files/pspice/libs/xtal.lib>
11. Electronics Designers' Handbook / ed. by L. J. Giacoletto. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Book Co., 1977. P. 16–31. URL: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/704861>

References

1. Golovnin V.A., Kaplunov I.A., Malyshkina O.V. et al. *Fizicheskie osnovy, metody issledovaniya i prakticheskoe primeneniye p'ezomaterialov = Physical foundations, research methods and practical application of piezomaterials*. Moscow: Tekhnosfera, 2013:272. (In Russ.)
2. Kandyby P.E., Pozdnyakova P.G. (eds.). *P'ezoelektricheskie rezonatory: spravochnik = Piezoelectric resonators : handbook*. Moscow: Radio i svyaz', 1992:392. (In Russ.)
3. *Ekvivalentnaya elektricheskaya skhema p'ezoelektricheskikh rezonatorov. AO P'ezo – Proizvodstvo kvartsevykh generatorov i rezonatorov = Equivalent electrical circuit of piezoelectric resonators. JSC Piezo – Production of quartz oscillators and resonators*. 2021. (In Russ.). Available at: https://www.oaopiezo.com/theory_6.html
4. Svetlov A.V., Nguen N.M. Measurement of parameters of resonant electrical circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(3):83–92. (In Russ.)
5. Svetlov A.V., Nguen N.M. Stand for the study of resonant electrical circuits. *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 measuring information ("Shlyandinsky Readings – 2020") : materials of the XII International Scientific and Technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:10–12. (In Russ.)
6. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki = Signal generator UNI-T UTG9002C-II. Technical specifications*. (In Russ.). Available at: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
7. Svetlov A.V., Nguen N.M. An amplitude detector for constructing measuring instruments for parameters of resonant electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(2):31–37. (In Russ.)
8. 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. «Shlyandinskije 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.)
9. *Spravochnyy material po p'ezotekhnike. Dobrotnost' p'ezoelektricheskikh rezonatorov. AO P'ezo – Proizvodstvo kvartsevykh generatorov i rezonatorov = Reference material on piezotechnics. The Q-factor of piezoelectric resonators. JSC Piezo – Production of quartz oscillators and resonators*. (In Russ.). 2021. Available at: https://www.oaopiezo.com/theory_8.html
10. *32768 hertz watch crystal. Library of quartz crystals. Copyright OrCAD, Inc. 1998 All Rights Reserved*. Available at: <http://robustdesignconcepts.com/-files/pspice/libs/xtal.lib>
11. Giacoletto L.J. (ed.). *Electronics Designers' Handbook. 2nd ed.* New York: McGraw-Hill Book Co., 1977:16–31. Available at: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/704861>

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)

Нгок Мань Нгуен

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Ngok Man' Nguen

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 02.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 10.05.2022

Принята к публикации/Accepted 13.06.2022