

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.317.3

*А. В. Светлов, А. С. Колдов,
Н. В. Родионова, Е. А. Ломтев, Б. Ф. Цыпин*

СОВОКУПНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Актуальность разработки средств измерений параметров пьезокерамических элементов обусловлена быстрым развитием пьезоэлектрического приборостроения и расширением области применения таких элементов. Целью работы является подтверждение возможности определения всех электрических параметров пьезокерамических элементов, представляемых четырехэлементными эквивалентными электрическими схемами.

Материалы и методы. Электрические параметры пьезокерамических элементов определяются путем решения системы уравнений, описывающих результаты совокупных измерений с синусоидальным и импульсным тестовыми сигналами.

Результаты. Представлена структурная схема стенда для автоматизированного проведения совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов. Приведена методика измерений. Путем моделирования в среде PSpice дана оценка погрешностей измерений, вносимых соединительным устройством, предназначенным для подключения пьезокерамического элемента к генератору тестовых сигналов и к измерительной схеме.

Выводы. Подтверждена возможность определения всех электрических параметров пьезокерамических элементов путем решения системы уравнений, описывающих результаты совокупных измерений с синусоидальным и импульсным тестовыми сигналами. Установлено, что соединительное устройство для подключения пьезокерамического элемента должно иметь малые монтажные емкости.

Ключевые слова: пьезокерамический элемент, эквивалентная электрическая схема, параметры, совокупные измерения, погрешность.

*A. V. Svetlov, A. S. Koldov,
N. V. Rodionova, E. A. Lomtev, B. F. Tsypin*

AGGREGATE MEASUREMENTS OF ELECTRICAL PARAMETERS OF PIEZOCERAMIC ELEMENTS

Abstract.

Background. The urgency of development of piezoceramic elements' parameters measuring means is caused by the rapid development of piezoelectric instrument engineering and by extension of the field of application of such elements. The re-

search aim is to confirm the possibility of determining all the electrical parameters of piezoceramic elements, represented by four-element equivalent circuits.

Materials and methods. Electrical parameters of piezoceramic elements are determined by solving the system of equations describing the results of measurements of the total sinusoidal and pulse test signals.

Results. The article presents a scheme of the stand for automatic measurement of the total parameters of piezoceramic elements and the measurement technique. By modeling in PSpice the authors assessed the measurement errors caused by the connecting device, designed to connect a piezoceramic element to a test signals generator and a measuring circuit.

Conclusions. The authors confirmed the possibility of determining all the electrical parameters of piezoceramic elements by solving a system of equations describing the results of the aggregate measurement of sinusoidal and pulse test signals. It has been found that the coupling device for connecting a piezoceramic element should have a small installation volume.

Key words: piezoceramic element, equivalent electric circuit, parameters, aggregate measurement, error.

Введение

Пьезокерамические элементы (ПКЭ) находят все более широкое применение в технике [1], поэтому повышается актуальность разработки средств технологического контроля основных параметров ПКЭ при их производстве, а также средств измерений для всестороннего исследования ПКЭ в научных лабораториях при разработке новых конструкторских и технологических решений. Для анализа характеристик ПКЭ удобно использовать их представление эквивалентными электрическими схемами. Наиболее широко применяется эквивалентная электрическая схема, представленная на рис. 1, где C_1 , L_1 , R_1 – динамические емкость, индуктивность и сопротивление; C_2 – параллельная емкость.

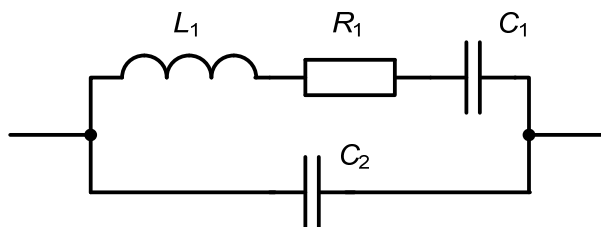


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема ПКЭ

Частоты f_0 и f_1 последовательного и параллельного резонансов (резонанса и антирезонанса) соответственно равны:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_1 C_1}}; \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_1 C_1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_2}}, \quad (2)$$

добротность равна

$$Q = \frac{2\pi f_0 L_1}{R_1}. \quad (3)$$

Средства измерений электрических параметров ПКЭ должны обладать широкими функциональными возможностями, высоким быстродействием и широкой полосой рабочих частот.

1. Стенд для совокупных измерений параметров ПКЭ

Имеющиеся в настоящее время средства используют тестовое воздействие в виде синусоидальных сигналов [2] или видеоимпульсов [3], что позволяет измерять лишь некоторые электрические параметры ПКЭ при сравнительно простой аппаратной реализации. Определение всех электрических параметров ПКЭ в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1) при использовании сигналов только одного вида сопряжено с большими техническими трудностями и большими погрешностями измерений. Предлагается совместить достоинства этих двух подходов, определяя одну часть параметров ПКЭ при импульсном воздействии с использованием метода инвариантного преобразования параметров электрических цепей [4], а другую часть параметров ПКЭ – при синусоидальном воздействии с использованием традиционного измерения частотной характеристики проводимости (сопротивления) ПКЭ [2]. Результаты выполненных совокупных измерений подставляются в систему уравнений, в результате решения которой определяются искомые параметры ПКЭ [5].

Для автоматизированного проведения совокупных измерений параметров ПКЭ разработан стенд, структурная схема которого приведена на рис. 2. Стенд представляет собой аппаратно-программный комплекс [6], гибкость и многофункциональность которого обеспечиваются за счет программного управления формирователем тестовых воздействий – цифроаналоговым преобразователем (ЦАП).

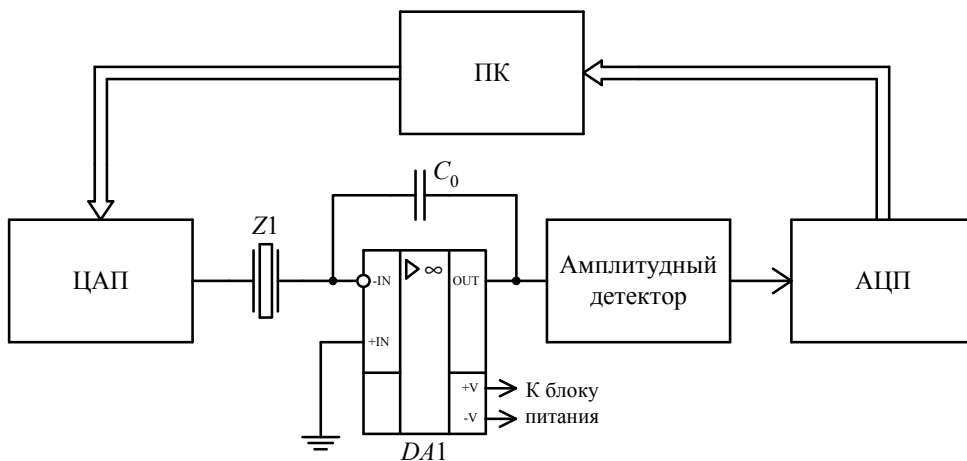


Рис. 2. Структурная схема стенда для измерения параметров ПКЭ

Исследуемый ПКЭ Z_1 включен во входной цепи операционного усилителя (ОУ) DA1, в цепи отрицательной обратной связи которого включен

опорный конденсатор с емкостью C_0 . Вспомогательные цепи стабилизации режима ОУ по постоянному току на схеме не показаны, чтобы не загромождать рисунок. DA1 – быстродействующий операционный усилитель ОРА655 [7] с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде. В качестве ЦАП предложено использовать генератор прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis – DDS) AD9851 [8], обладающий высоким разрешением (до 0,04 Гц) и быстрой перестройкой частоты. Для формирования импульсных измерительных сигналов использовался внутренний быстродействующий компаратор, входящий в состав микросхемы AD9851. Амплитудный детектор предназначен для выделения огибающей сигнала. Выбор аналого-цифрового преобразователя (АЦП) не критичен. ПК – персональный компьютер с программным обеспечением работы стенда, подготовленным в среде LabVIEW.

В данной работе в качестве примера рассматривается определение параметров ПКЭ, представляемого эквивалентной схемой (рис. 1) при $C_1 = 5$ пФ; $L_1 = 0,5$ Гн; $R_1 = 1$ кОм; $C_2 = 20$ пФ. В соответствии с формулами (1)–(3) резонансные частоты и добротность соответственно равны: $f_0 = 100,6584$ кГц; $f_1 = 112,5395$ кГц; $Q = 316,2278$. С целью детального исследования режимов измерений и выявления потенциальных источников погрешностей приводятся результаты схемотехнического моделирования с применением программы PSpice пакета OrCAD [9] измерительной схемы, включающей ПКЭ, ОУ, опорный конденсатор C_0 , идеальный источник тестового сигнала. Реальные характеристики ОУ ОРА655 учитываются в его макромодели [10], предоставленной фирмой-разработчиком Burr-Brown Corporation.

2. Методика измерения параметров пьезокерамических элементов

Для определения параметров ПКЭ по результатам совокупных измерений предложена методика, предусматривающая следующие этапы:

1. Выбирается емкость C_0 опорного конденсатора, приблизительно равная сумме ожидаемых значений емкостей C_1 и C_2 . В рассматриваемом примере $C_0 = 25$ пФ.

2. На ПКЭ, включенный во входной цепи ОУ, подается синусоидальное напряжение, частота которого изменяется в диапазоне ожидаемых значений частоты последовательного резонанса. Осуществляется поиск резонансной частоты с итерационным сужением диапазона поиска. По мере приближения к резонансу уменьшается амплитуда входного воздействия, чтобы не допустить превышения максимального допустимого значения выходного напряжения ОУ. Измеряются частота последовательного резонанса f_0 и амплитуда выходного напряжения на этой частоте. Затем измеряются частоты выше и ниже резонансной, при которых амплитуда выходного напряжения составляет 0,707 от резонансного значения. Определяются расстройка $2\Delta f$ и добротность $Q = f_0/2\Delta f$. Измеряется частота параллельного резонанса (антирезонанса) f_1 .

На рис. 3 и 4 приведены амплитудно-частотные характеристики (зависимости амплитуды выходного напряжения ОУ от частоты), полученные в результате моделирования измерительной схемы с учетом неидеальности ОУ. Паразитные параметры соединительного устройства, обеспечивающего подключение ПКЭ к источнику тестового сигнала и ко входу ОУ, на данном этапе не учитываются.

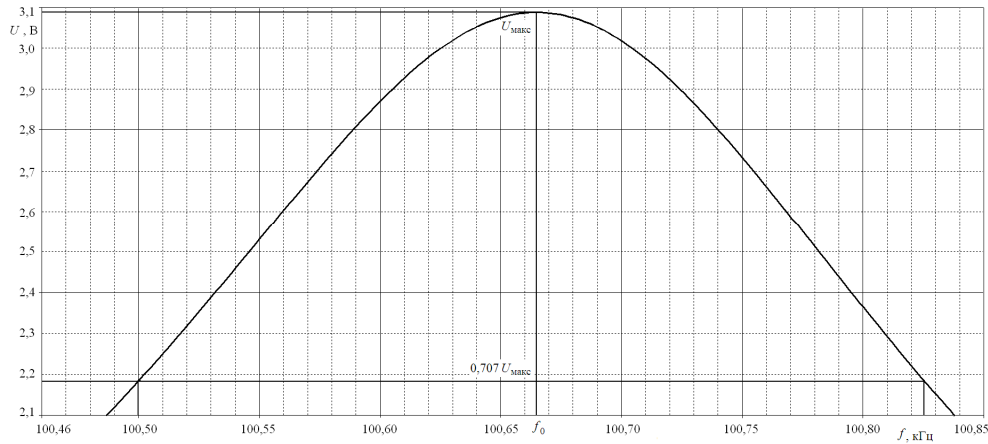


Рис. 3. К определению частоты резонанса и добротности

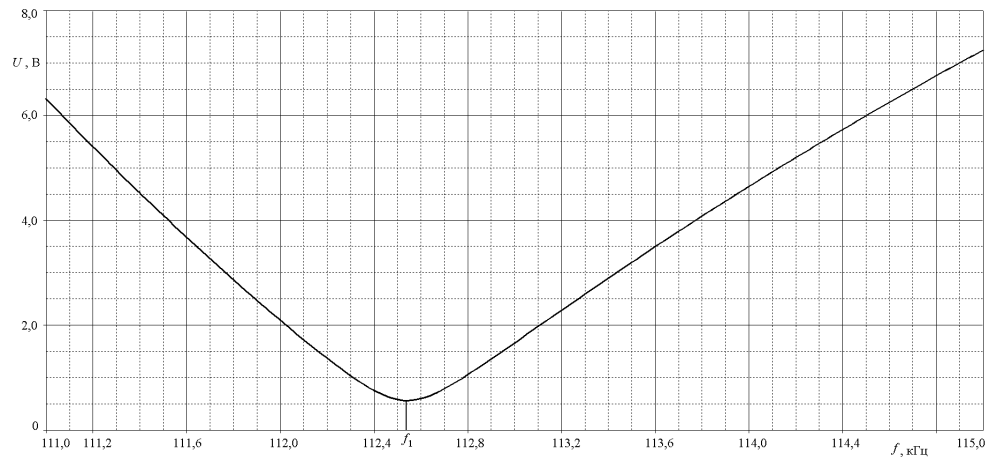


Рис. 4. К определению частоты антирезонанса

В рассматриваемом примере получены следующие измеренные (полученные в результате моделирования) значения: $f_{0 \text{ изм}} = 100,665 \text{ кГц}$; $2\Delta f_{\text{изм}} = 0,325 \text{ кГц}$; $Q_{\text{изм}} = 309,74$; $f_{1 \text{ изм}} = 112,538 \text{ кГц}$. Относительные погрешности определения этих параметров, обусловленные неидеальностью ОУ, соответственно равны: $\delta f_0 = 0,0065 \%$; $\delta f_1 = -0,0014 \%$; $\delta Q = -2,05 \%$.

3. На ПКЭ, включенный во входной цепи ОУ, подается перепад (скачок) постоянного напряжения U_0 , примерно равный половине значения мак-

симального выходного напряжения ОУ. В рассматриваемом примере $U_0 = 2$ В. Выходное напряжение ОУ описывается следующим выражением:

$$U(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} \cdot \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega} \cdot e^{-at} \sin(\omega t + \Theta) \right] + \frac{U_0 C_2}{C_0}, \quad (4)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – круговая частота последовательного резонанса;

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - a^2}$; $\Theta = \arctg \frac{\omega}{a}$ – частота и начальная фаза колебаний в цепи;

$a = \frac{R_1}{2L_1}$ – декремент затухания колебаний в цепи.

Поскольку $\omega_0/\omega \approx 1$, выходное напряжение амплитудного детектора описывается выражением

$$U_{\text{АД}}(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} \cdot (1 - e^{-at}) + \frac{U_0 C_2}{C_0}. \quad (5)$$

С помощью АЦП фиксируется установившееся значение выходного напряжения амплитудного детектора, пропорциональное сумме C_1 и C_2 :

$$U_{\text{уст}} = \frac{U_0 (C_1 + C_2)}{C_0}. \quad (6)$$

В рассматриваемом примере рассчитанное по формуле (6) значение составило $U_{\text{уст}} = 2$ В, а полученное в результате моделирования $U_{\text{уст. изм}} = 1,996$ В. Относительная погрешность: $\delta U_{\text{уст}} = -0,2$ %.

4. По результатам проведенных совокупных измерений параметров ПКЭ с разными тестовыми сигналами составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_0 (C_{1 \text{ изм}} + C_{2 \text{ изм}})}{C_0} = U_{\text{уст. изм}}, \\ \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{1 \text{ изм}} C_{1 \text{ изм}}}} = f_{0 \text{ изм}}, \\ \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{1 \text{ изм}} C_{1 \text{ изм}}}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_{1 \text{ изм}}}{C_{2 \text{ изм}}}} = f_{1 \text{ изм}}, \end{cases} \quad (7)$$

в результате решения которой определяются значения параметров: $C_{1 \text{ изм}}$, $C_{2 \text{ изм}}$, $L_{1 \text{ изм}}$. В рассматриваемом примере: $C_{1 \text{ изм}} = 4,987$ пФ; $C_{2 \text{ изм}} = 19,963$ пФ; $L_{1 \text{ изм}} = 0,501$ Гн. Относительные погрешности: $\delta C_1 = -0,26$ %; $\delta C_2 = -0,18$ %; $\delta L_1 = 0,25$ %.

5. По найденным значениям индуктивности $L_{1 \text{ изм}}$ и добротности $Q_{\text{изм}}$ определяется значение сопротивления $R_{1 \text{ изм}}$:

$$R_{1 \text{ изм}} = \frac{2\pi f_0 L_{1 \text{ изм}}}{Q_{\text{изм}}} . \quad (8)$$

В рассмотренном примере $R_{1 \text{ изм}} = 1,021 \text{ кОм}$; $\delta R_1 = 2,1 \%$.

6. Определение значения сопротивления R_1 возможно не только через измеренное значение добротности Q , но и через другую характеристику потерь в ПКЭ – декремент затухания колебаний a . Для измерения декремента затухания можно использовать предложенный в [11] способ, заключающийся в получении двух отсчетов огибающей экспоненциально изменяющегося напряжения $U(t_1)$ и $U(2t_1)$ в некоторые кратные моменты времени t_1 и $2t_1$, а также отсчета установившегося напряжения $U_{\text{уст}}$, с последующим вычислением искомого декремента затухания по формуле

$$a = \frac{\ln \left(\frac{U_{\text{уст}} - U(t_1)}{U_{\text{уст}} - U(2t_1)} \right)}{t_1} . \quad (9)$$

С целью уменьшения методической погрешности момент t_1 рекомендуется выбирать с учетом ожидаемого диапазона значений a [11]:

$$\frac{0,5}{a} \leq t_1 \leq \frac{1,5}{a} . \quad (10)$$

В рассматриваемом примере выбрано значение $t_1 = 1 \text{ мс}$, получены отсчеты $U(t_1)_{\text{изм}} = 1,851 \text{ В}$; $U(2t_1)_{\text{изм}} = 1,943 \text{ В}$ (фрагмент временной диаграммы выходного напряжения ОУ показан на рис. 5). С учетом полученного ранее значения $U_{\text{уст. изм}} = 1,996 \text{ В}$ по формуле (9) определяется значение $a_{\text{изм}} = 1006,44$, а затем по найденному ранее значению индуктивности $L_{1 \text{ изм}}$ определяется значение сопротивления $R_{1 \text{ изм}}$:

$$R_{1 \text{ изм}} = 2 L_{1 \text{ изм}} \cdot a_{\text{изм}} . \quad (11)$$

В рассмотренном примере $R_{1 \text{ изм}} = 1,009 \text{ кОм}$; $\delta R_1 = 0,9 \%$.

По формуле (3) вычисляется добротность $Q_{\text{изм}} = 314,22$; $\delta Q = -0,63 \%$.

Таким образом, предложенная методика позволяет определить все электрические параметры ПКЭ в соответствии с четырехэлементной эквивалентной электрической схемой (рис. 1). Погрешность, с которой могут быть найдены искомые параметры, зависит от соотношений между этими параметрами. В рассмотренном примере относительная погрешность определения параметров ПКЭ не превышает 2 %. Сравнивая два имеющих соизмеримые погрешности пути определения сопротивления R_1 , характеризующего элек-

трические потери в ПКЭ – по измеренной добротности или по измеренному декременту затухания, – можно отметить, что измерение добротности требует больших затрат времени, так как предполагает итерационные процессы поиска частот выше и ниже резонансной частоты, при которых амплитуда выходного напряжения составляет 0,707 от резонансного значения.

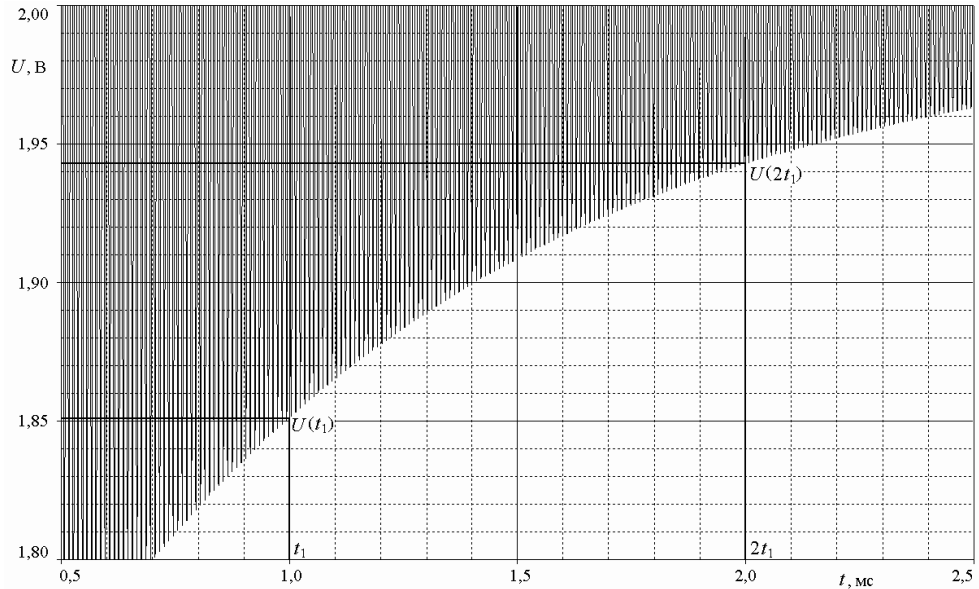


Рис. 5. К определению декремента затухания колебаний

При построении средств технологического контроля ПКЭ может возникнуть необходимость создания программного обеспечения, реализующего данную методику в виде исполняемого файла без размещения на персональном компьютере математических пакетов, обеспечивающих решение систем уравнений. В этом случае можно использовать следующие формулы для расчета параметров элементов эквивалентной схемы ПКЭ по измеренным значениям f_0 , f_1 и $U_{уст}$:

$$C_1 = \frac{U_{уст} C_0 (f_1^2 - f_0^2)}{U_0 f_1^2}; C_2 = \frac{U_{уст} C_0 f_0^2}{U_0 f_1^2}; L_1 = \frac{U_0 f_1^2}{4\pi^2 U_{уст} C_0 f_0^4 \left(\frac{f_1^2}{f_0^2} - 1 \right)}. \quad (12)$$

4. Погрешности измерения параметров ПКЭ, обусловленные влиянием соединительного устройства

Для подключения ПКЭ к средствам измерения используется соединительное устройство (в [12] – держатель), оказывающее влияние на результаты измерений параметров ПКЭ. На рис. 6 приведена эквивалентная электрическая схема измерительной цепи, включающей источник тестового сигнала, соединительное устройство, ПКЭ, ОУ с опорным конденсатором емкостью C_0 . ПКЭ представлен эквивалентной электрической схемой (рис. 1), содер-

жащей элементы: L_1 , R_1 , C_1 , C_2 . Электрические параметры соединительного устройства представляют следующие элементы:

C_{p1} и R_{p1} – эквивалентные емкость и сопротивление потерь кабеля, соединяющего ПКЭ с источником тестового сигнала;

L_s и R_s – последовательно включенные индуктивность и сопротивление проводников соединительного устройства;

C_{p2} и R_{p2} – монтажная емкость соединительного устройства и сопротивление потерь этой конструкции;

C_{p3} – паразитная емкость монтажа платы в месте подключения ПКЭ к инвертирующему входу ОУ.

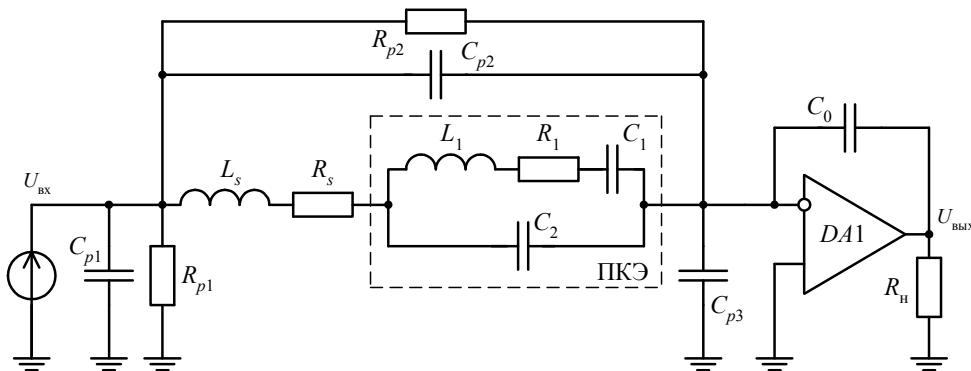


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема измерительной цепи

Исследование влияния параметров соединительного устройства на значения резонансных частот ПКЭ проводилось путем моделирования схемы рис. 6 с применением программы PSpice пакета OrCAD. При моделировании использовались указанные выше значения параметров элементов эквивалентной схемы ПКЭ и емкости C_0 , а значения параметров остальных элементов схемы (рис. 6) варьировались в их возможных диапазонах. Установлено, что на значение частоты резонанса вариация параметров соединительного устройства влияния практически не оказывает. На значение частоты антирезонанса наиболее сильно влияет монтажная емкость соединительного устройства C_{p2} . На рис. 7 показана зависимость погрешности измерения частоты антирезонанса δf_1 от емкости C_{p2} , варьируемой в пределах от 0,2 до 10 пФ. Моделирование проводилось при следующих значениях параметров: амплитуда входного синусоидального напряжения 50 мВ; $C_{p1} = 10$ пФ; $R_{p1} = 1$ МОм; $L_s = 1$ мкГн; $R_s = 1$ Ом; $C_{p3} = 5$ пФ; $R_{p2} = 2$ МОм.

На погрешности измерения параметров ПКЭ, представляемых эквивалентной схемой (рис. 1), также наиболее сильно влияет монтажная емкость соединительного устройства C_{p2} , причем наибольшее влияние оказывается на погрешность измерения параллельной емкости ПКЭ δC_2 . График этой зависимости приведен на рис. 8, из которого видно, что для получения по-

грешности измерения менее 5 % необходимо, чтобы монтажная емкость не превышала 1 пФ.

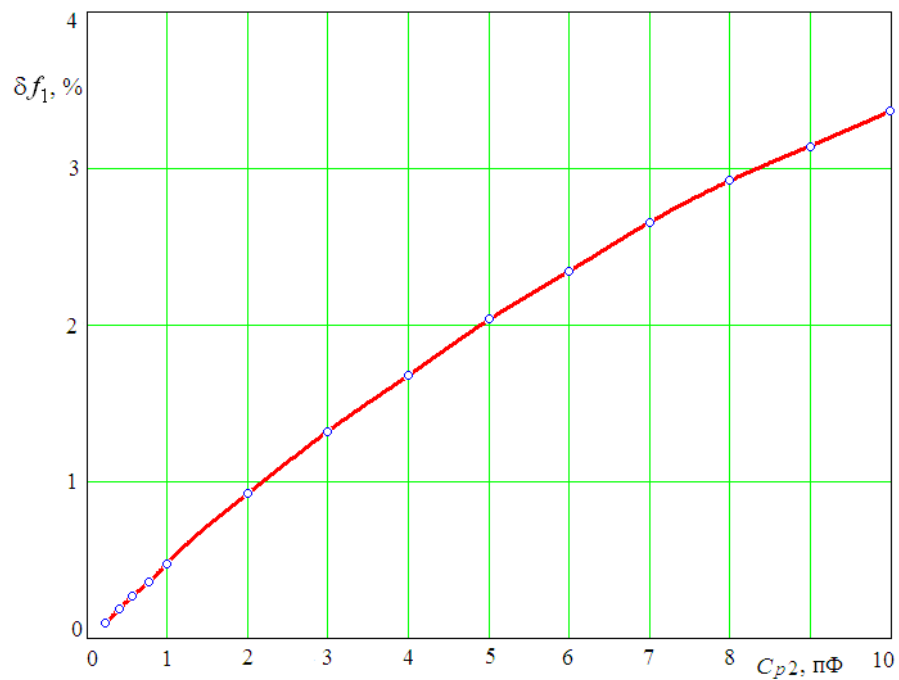


Рис. 7. График зависимости погрешности измерения частоты антирезонанса от монтажной емкости соединительного устройства



Рис. 8. График зависимости погрешности измерения параллельной емкости ПКЭ от монтажной емкости соединительного устройства

Проведенное исследование показывает, что при разработке конструкции соединительного устройства в первую очередь должна быть обеспечена малая монтажная емкость.

Заключение

Предложенные аппаратно-программный комплекс и методика совокупных измерений позволяют определить все электрические параметры ПКЭ в соответствии с четырехэлементной эквивалентной электрической схемой путем решения системы уравнений, описывающих результаты совокупных измерений с синусоидальным и импульсным тестовыми сигналами.

Список литературы

1. **Янчич, В. В.** Пьезоэлектрические акселерометры с двумя динамическими и частотными диапазонами / В. В. Янчич, Д. В. Джения, Вл. В. Янчич // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 127–134.
2. **Земляков, В. Л.** Методы и средства технической диагностики пьезокерамических элементов / В. Л. Земляков // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 10. – С. 61–65.
3. Авторское свидетельство. 1308939 СССР. Устройство для измерения статических параметров кварцевых резонаторов / Гаевский Ю. С., Мартяшин А. И., Светлов А. В., Цыпин Б. В. // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 17. – С. 151, 152.
4. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова ; под ред. А. И. Мартяшина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
5. Измерение электрических параметров пьезокерамических элементов / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, Б. В. Цыпин, А. В. Светлов // Новые технологии : материалы X Всерос. конф. – М. : РАН, 2013. – Т. 2. – С. 149–154.
6. Принципы построения аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, И. В. Ханин, П. Мишра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 102–112.
7. OPA655 Wideband, Unity Gain Stable, FET-Input Operational Amplifier. – Burr-Brown Corporation, 2000. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa655.pdf>.
8. AD9851 CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer. – Analog Devices, Inc., 2004. – URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851.pdf.
9. **Разевиг, В. Д.** Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 520 с.
10. OPA655 PSpice Model (Rev. B, 05.05.2000). Burr-Brown Corporation. – Sbm111a. – URL: <http://www.ti.com/product/OPA655/toolssoftware>.
11. Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы / А. Н. Андреев, В. А. Казаков, А. В. Светлов, Д. А. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 8. – С. 19–22.
12. **Кондаков, Е. В.** Анализ источников погрешностей измерения параметров пьезоэлементов и пути их снижения / Е. В. Кондаков // Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сб. тр. Междунар. молодеж. конф. (г. Анапа, 23–27 сентября, 2013). – Ростов н/Д : Изд-во Южного федерального ун-та, 2013. – С. 172–175.

References

1. Yanchich V. V., Dzheniya D. V., Yanchich Vl. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 3 (27), pp. 127–134.

2. Zemlyakov V. L. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [University proceedings. Instrument engineering]. 2010, vol. 53, no. 10, pp. 61–65.
3. Certificate of authorship 1308939 USSR. Gaevskiy Yu. S., Martyashin A. I., Svetlov A. V., Tsylin B. V. *Otkrytiya. Izobreteniya* [Discoveries. Inventions]. 1987, no. 17, pp. 151–152.
4. 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 p.
5. Dmitrienko A. G., Blinov A. V., Tsylin B. V., Svetlov A. V. *Novye tekhnologii: materialy X Vseros. konf.* [New technologies: proceedings of X All-Russian conference]. Moscow: RAN, 2013, vol. 2, pp. 149–154.
6. Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Khanin I. V., Mishra P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 3 (11), pp. 102–112.
7. *OPA655 Wideband, Unity Gain Stable, FET-Input Operational Amplifier*. Burr-Brown Corporation, 2000. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa655.pdf>.
8. *AD9851 CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer*. Analog Devices, Inc., 2004. Available at: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851.pdf.
9. Razevig V. D. *Sistema proektirovaniya OrCAD 9.2* [OrCAD 9.2 design system]. Moscow: SOLON-R, 2001, 520 p.
10. *OPA655 PSpice Model (Rev. B, 05.05.2000)*. Burr-Brown Corporation. Sbm111a. Available at: <http://www.ti.com/product/OPA655/toolssoftware>.
11. Andreev A. N., Kazakov V. A., Svetlov A. V., Svetlov D. A. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology]. 1999, no. 8, pp. 19–22.
12. Kondakov E. V. *Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya: sb. tr. Mezhdunar. molodezh. konf. (g. Anapa, 23–27 sentyabrya, 2013)* [Topical problems of piezoelectric instrument engineering: collected articles of the International youth conference (Anapa, 23–27 September 2013)]. Rostov-on-Don: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo un-ta, 2013, pp. 172–175.

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

Svetlov Anatoliy Vil'evich

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

Колдов Александр Сергеевич

старший преподаватель, кафедра
радиотехники и радиоэлектронных
систем, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Koldov Aleksandr Sergeevich

Senior lecturer, sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Родионова Нина Владимировна

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

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Rodionova Nina Vladimirovna

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

Ломтев Евгений Александрович

доктор технических наук, профессор, кафедра информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Lomtev Evgeniy Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of information-measuring technology and metrology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор, кафедра ракетно-космического и авиационного приборостроения (на базе ОАО «НИИФИ»), Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rkap@pnzgu.ru

Tsypin Boris Vul'fovich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of space-rocket and aircraft instrument engineering (on the basis of "RIFM" Plc.), Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Совокупные измерения электрических параметров пьезокерамических элементов / А. В. Светлов, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, Е. А. Ломтев, Б. Ф. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 123–135.