

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ¹

А. В. Светлов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Н. В. Родионова

AUTOMATED MEASURING SYSTEM FOR TESTING PARAMETERS OF PIEZOELECTRIC MATERIALS

A. V. Svetlov, A. V. Knyazkov, M. Yu. Parshukov, N. V. Rodionova

Аннотация. *Актуальность и цели.* Изделия из пьезоматериалов широко применяются в качестве первичных измерительных преобразователей для контроля параметров промышленного оборудования в различных областях техники. Работая в жестких условиях эксплуатации, изделия из пьезоматериалов должны максимально сохранять свои параметрические характеристики. Это обуславливает необходимость разработки измерителей, способных осуществлять контроль и анализ параметров изделий из пьезоматериалов. *Материалы и методы.* В статье рассмотрена структура аппаратной части автоматизированного измерителя параметров изделий из пьезоматериалов. *Результаты.* Было проведено моделирование измерительной схемы, получены графики АЧХ и определены электрические параметры для модели пьезокерамического элемента. *Выводы.* Автоматизированный измеритель параметров изделий из пьезоматериалов позволяет определять резонансные частоты, добротность и электрические параметры пьезокерамических элементов в соответствии с четырехэлементной эквивалентной электрической схемой.

Ключевые слова: пьезоматериалы, автоматизированный измеритель, программное обеспечение.

Abstract. *Background.* Products from piezomaterials are widely used as primary measuring converters for monitoring the parameters of industrial equipment in various fields of technology. Working in harsh operating conditions, products from piezomaterials should preserve their parametric characteristics as much as possible. This necessitates the development of measuring system for monitoring and analyzing the parameters of piezomaterials. *Materials and methods.* The article describes the structure of the hardware of the automated meter piezomaterials parameters. *Results.* The simulation of the measuring circuit was made, the AFC curves were obtained and the electrical parameters for the model of the piezoceramic element were determined. *Conclusions.* Automated measuring instrument of piezomaterial products allows to determine the resonance frequencies, quality factor and electrical parameters of piezoceramic elements in accordance with the four-element equivalent electrical circuit.

Key words: piezoelectric materials, automated meter, software.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00233 «Аппаратно-программные комплексы для автоматизированного измерения частотных и временных параметров аналоговых микросхем и пьезокерамических элементов».

Введение

Многие современные электронные устройства как бытового, так и промышленного и военного назначения, используют в своем составе изделия из пьезоматериалов. Пьезокерамические элементы (ПКЭ) находят широкое применение в измерительной технике, акустоэлектронике, медицине и являются основой датчиков различных физических величин и преобразователей [1].

Создание новых пьезоматериалов, а также ПКЭ с заданными электрическими и физическими параметрами требует новых методов контроля их параметров при производстве.

Данная работа посвящена разработке измерителя параметров изделий из пьезоматериалов, отличающегося автоматизацией процессов подготовки и проведения измерительного эксперимента за счет использования в аппаратной части измерителя программно-управляемых модулей.

Структура автоматизированного измерителя параметров изделий из пьезоматериалов

Предлагаемый измерительный комплекс производит измерения согласно четырехэлементной эквивалентной электрической схеме [2]. Электрические параметры ПКЭ определяются методом совокупных измерений с использованием нескольких тестовых сигналов и последующим решением системы уравнений, описывающих выходные сигналы измерительной схемы, в которую включается исследуемый ПКЭ [3]. В данной работе используется методика совокупных измерений параметров ПКЭ с несколькими тестовыми синусоидальными сигналами, частоты которых соответствуют характерным точкам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерительной схемы.

На рис. 1 представлена структурная схема устройства.

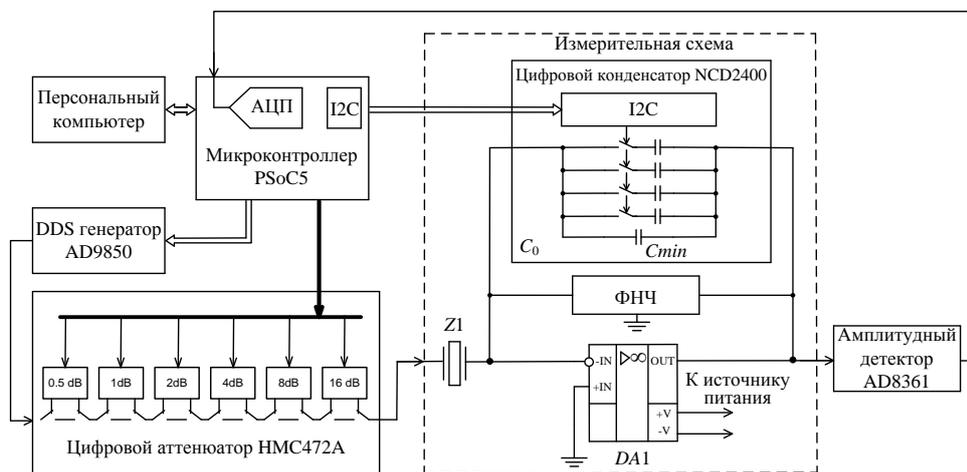


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного измерителя параметров изделий из пьезоматериалов

Исследуемый ПКЭ включается во входной цепи измерительной схемы на основе быстродействующего операционного усилителя (ОУ), в цепи отрицательной обратной связи которого включен опорный конденсатор.

Для исключения влияния на точность измерения в измерительной схеме необходимо использовать быстродействующий операционный усилитель с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде. Усилители с входным каскадом на полевых транзисторах с управляющим р–п-переходом JFET (Junction-Field-Effect-Transistors) обеспечивают высокое входное сопротивление и сверхнизкий входной ток смещения, что позволяет применять их в схемах, требующих высокого быстродействия.

К числу таких усилителей относится ОУ ОРА656 компании Texas Instruments [4]. Микросхема ОРА656 обладает полосой пропускания 500 МГц, весьма низким уровнем шума ($7 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$), малыми нелинейными искажениями, высоким коэффициентом усиления (65 дБ) и малым выходным сопротивлением (0,01 Ом), что позволяет на практике рассматривать эти ОУ как близкие к идеальным.

Емкость опорного конденсатора в цепи обратной связи ОУ выбирается приблизительно равной сумме ожидаемых значений емкостей эквивалентной схемы ПКЭ и зависит от типа материала и геометрических размеров.

В качестве опорного конденсатора используется программно-управляемый конденсатор переменной емкости с энергонезависимой памятью NCD2400 [5], построенный по схеме цифровой программируемой матрицы конденсаторов, выполненных на одном кристалле с интерфейсной и управляющей логикой. Емкость конденсатора может изменяться в диапазоне от 1,7 пФ до 194 пФ с шагом 0,376 пФ. Значение запрограммированной емкости хранится в энергонезависимой памяти. Установка требуемого значения емкости производится через двухпроводный последовательный интерфейс в соответствии с управляющими командами микроконтроллера. Применение данной микросхемы позволяет не только значительно сократить число компонентов на печатной плате, но и дает возможность разработать автоматизированный аппаратно-программный комплекс.

Для стабилизации режима работы ОУ измерительной схемы по постоянному току в цепи обратной связи ОУ параллельно емкости C_0 включен Т-образный фильтр нижних частот.

Для формирования синусоидальных тестовых сигналов различных частот используется программно-управляемый генератор AD9850, обладающий высоким разрешением и быстрой перестройкой частоты. Частота синусоидального напряжения генератора изменяется с целью определения резонансных частот и добротности исследуемого ПКЭ.

Поиск резонансной частоты осуществляется в соответствии с разработанной авторами методикой при итерационном сужении диапазона поиска. По мере приближения к резонансу необходимо уменьшать амплитуду выходного сигнала генератора, чтобы не допустить превышения максимального допустимого значения выходного напряжения ОУ измерительной схемы. Регулирование амплитуды сигнала осуществляется с помощью аттенюатора, ослабляющего выходной сигнал в необходимое количество раз. На практике

получили распространение резистивные аттенюаторы с использованием резисторов постоянного сопротивления на основе Т- или П-образных звеньев.

Так как разработанный измеритель представляет аппаратно-программный комплекс, он не предполагает наличие внешних органов управления, а все управление осуществляется микроконтроллером путем подачи команд из управляющей программы на персональном компьютере.

В качестве аттенюатора была выбрана микросхема НМС472А [6] с цифровым управлением, представляющая собой сборку из сверхминиатюрных резистивных СВЧ-аттенюаторов микрополосковой конструкции с полосой частот от постоянного тока до десятков гигагерц. Аттенюатор позволяет осуществлять регулирование амплитуды сигнала в диапазоне значений от 0 до 31,5 дБ с шагом 0,5 дБ.

Огибающая выходного напряжения измерительной схемы выделяется линейным амплитудным детектором AD8361, обладающим большим коэффициентом передачи в широкой полосе рабочих частот.

Оцифровка выходного сигнала детектора, управление DDS-генератором и программно-управляемыми конденсатором и аттенюатором, а также взаимодействие аппаратной части с персональным компьютером осуществляются с помощью программируемой системы на кристалле PSoC 5.

Моделирование измерительной схемы на ОУ

Было проведено моделирование измерительной схемы на ОУ ОРА656. На рис. 2 приведена принципиальная схема измерительной части на ОУ, моделирование которой осуществлялось с применением программы PSpice пакета OrCAD. Согласно схеме замещения C_1 , L_1 , R_1 – динамические емкость, индуктивность и сопротивление; C_2 – параллельная емкость.

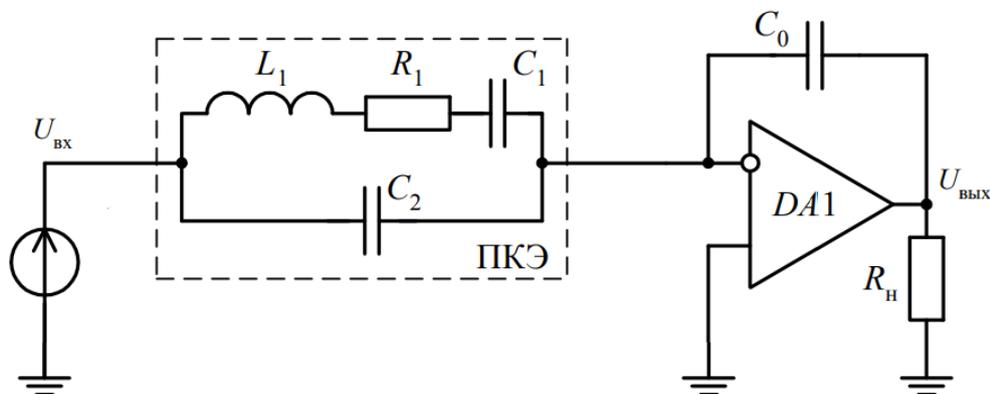


Рис. 2. Модель измерительной схемы в OrCAD

Моделирование проводилось с использованием модели ОУ ОРА656 [7] при следующих значениях параметров четырехкомпонентной эквивалентной схемы замещения: $C_1 = 5$ пФ; $L_1 = 0,5$ Гн; $R_1 = 1$ кОм; $C_2 = 20$ пФ. Емкость конденсатора C_0 выбрана равной 25 пФ, а амплитуда входного синусоидального напряжения установлена равной 50 мВ.

На вход измерительной схемы подавалось синусоидальное напряжение с идеального источника сигнала. Частота синусоидального напряжения изменялась в диапазоне ожидаемых значений частоты последовательного резонанса. На рис. 3 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) измерительной схемы.

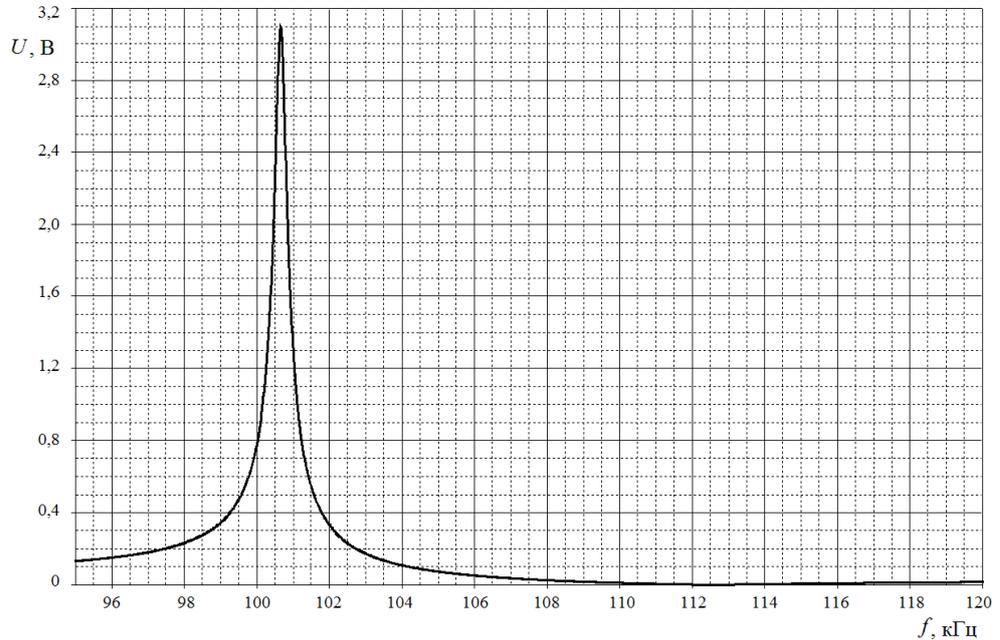


Рис. 3. АЧХ измерительной схемы

Далее производилось измерение частоты последовательного резонанса f_0 и амплитуды $U_{\text{макс}}$ выходного напряжения на этой частоте. Затем измерялись частоты f' и f'' выше и ниже резонансной частоты, при которых амплитуда выходного напряжения составляла $0,707 \cdot U_{\text{макс}}$. АЧХ измерительной схемы в области резонанса приведена на рис. 4.

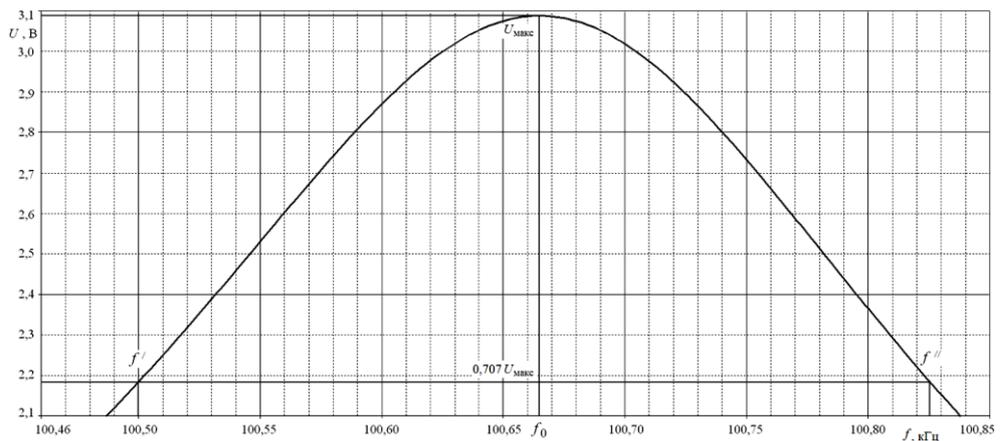


Рис. 4. АЧХ измерительной схемы в области резонанса

Значения резонансных частот и добротности соответственно равны $f_0 = 100,6584$ кГц; $f_1 = 112,5395$ кГц; $Q = 316,2278$.

По измеренным значениям частот f_0 , f' и f'' определялись расстройка $2\Delta = f'' - f'$ и добротность $Q = f_0/2\Delta f$, измерялась частота параллельного резонанса (антирезонанса) f_1 . АЧХ измерительной схемы в области антирезонанса приведена на рис. 5.

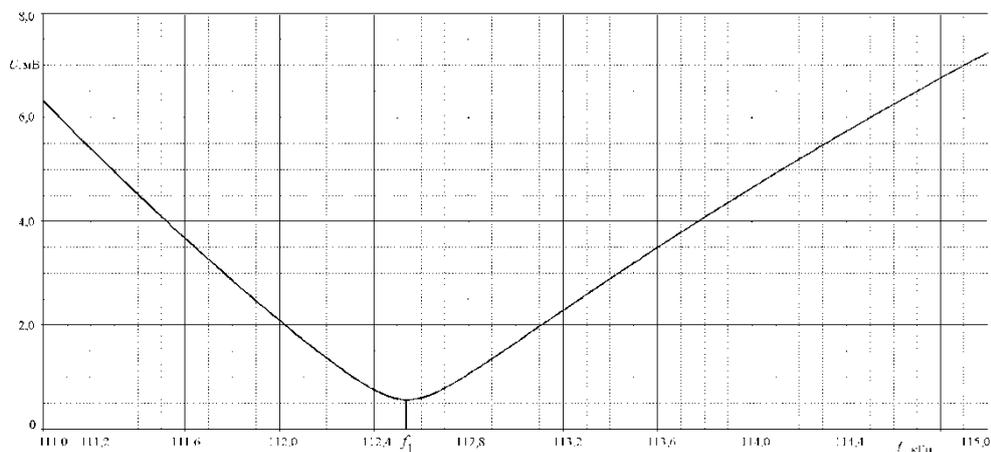


Рис. 5. АЧХ измерительной схемы в области антирезонанса

В рассматриваемом примере получены следующие измеренные значения резонансных частот, расстройки и добротности: $f_{0\text{изм}} = 100,665$ кГц; $f_{1\text{изм}} = 112,538$ кГц; $2\Delta f_{\text{изм}} = 0,325$ кГц; $Q_{\text{изм}} = 309,74$.

Программное обеспечение разработанного автоматизированного измерителя параметров изделий из пьезоматериалов составлено в среде графического программирования LabVIEW с применением дополнительного пакета LINX, который представляет собой слой аппаратных абстракций, что позволяет иметь единый интерфейс LabVIEW для множества различных аппаратных устройств и микроконтроллеров.

Для ввода исходных данных и представления результатов измерений разработан соответствующий виртуальный прибор, на лицевой панели которого отображаются измеренные значения частот резонанса и антирезонанса, добротности и параметров пьезоматериалов в соответствии с принятой для измерения четырехэлементной эквивалентной электрической схемой.

Заключение

Изготовлен действующий макет автоматизированного измерителя параметров изделий из пьезоматериалов. Отличительной особенностью предлагаемого измерителя является высокое быстродействие, которое достигается за счет использования в аппаратной части современной элементной базы: программно-управляемого DDS-генератора, быстродействующего операционного усилителя для построения измерительной схемы, аналого-цифрового преобразователя с программно-управляемым разрешением, программно-

управляемого аттенюатора с регулируемым коэффициентом усиления. Для управления автоматизированным измерителем в среде LabVIEW разработаны виртуальные приборы, позволяющие проводить измерения параметров ПКЭ в автоматизированном режиме с высоким быстродействием.

Библиографический список

1. Земляков, В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении : монография / В. Л. Земляков. – Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2009. – Т. 5. Пьезоэлектрическое приборостроение. – 180 с.
2. Светлов, А. В. Определение электрических параметров пьезокерамических элементов, представляемых четырехэлементной эквивалентной схемой / Н. В. Родионова, А. С. Колдов, А. В. Светлов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2015. – № 04 (26). – С. 106–114. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23636629>
3. Князьков, А. В. Измерительный стенд для исследования пьезокерамических элементов / А. В. Князьков, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // сб. тр. XV Международ. конф. NIDays-2016 (Москва, 25 ноября 2016 г.). – М. : ДМК Пресс, 2016. – С. 157–160. – URL: http://www.labview.ru/conference/Sbornik_NIDays2016.pdf
4. OPA656 Wideband, Unity Gain Stable, FET-Input Operational Amplifier. – Texas Instruments. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa656.pdf>
5. Цифровой программируемый конденсатор NCD2400. – URL: <https://www.ixysiss.com/ncd2400>
6. Цифровой аттенюатор HMC472A. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc472a.pdf>
7. OPA656 PSpice Model (Rev. B). Texas Instruments (NASDAQ: TXN). – URL: <http://www.ti.com/product/OPA656/toolssoftware>

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный
университет
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoly Vilyevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University

Князьков Александр Владимирович

аспирант,
Пензенский государственный
университет
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Knyazkov Aleksander Vladimirovich

postgraduate student,
Penza State University

Паршуков Максим Юрьевич

кандидат технических наук, инженер,
Пензенский государственный
университет
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Parshukov Maxim Yuryevich

candidate of technical sciences, engineer,
Penza State University

Родионова Нина Владимировна
аспирант,
Пензенский государственный
университет
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Rodionova Nina Vladimirovna
postgraduate student,
Penza State University

УДК 621.317.3

Светлов, А. В.

Автоматизированный измеритель параметров изделий из пьезоматериалов / А. В. Светлов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Н. В. Родионова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 4 (24). – С. 168–175.